

PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Lehrstuhl für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

30-0082  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BRAUNSCHWEIG

Festigkeits- und Verformungsverhalten von stahlfaserbewehrtem  
Normalbeton unter hohen und schnell ablaufenden Belastungen

Bericht erstattet  
von

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. K. Hartwich

B I B L I O T H E K  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Braunschweig, Juli 1983

Die Untersuchungen wurden im Auftrag und mit finanzieller Unterstützung des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau durchgeführt: Aktenzeichen: B I 7 - 81 07 05 - 298

## VORWORT

Bekanntlich weist Normalbeton, der mit Stahlfasern armiert ist, sowohl bei Druck- als auch bei Zugbeanspruchung, u.a. im sog. postkritischen Bereich, ein wesentlich duktileres Verhalten als nichtarmerter Normalbeton auf. Diese Feststellung gilt für eine langsame Belastung. Die Forschungsarbeit sollte klären, ob diese Aussage auch bei schneller Belastung Gültigkeit besitzt. Da die Duktilität des Werkstoffes Beton bei Katastrophenbelastungen von Bedeutung ist, wurde der Forschungsantrag beim Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, im Rahmen des Forschungsprogramms "Allgemeiner baulicher Katastrophenschutz", vorgelegt und von diesem genehmigt. Die Verfasser bedanken sich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Ehm für die Förderung.

## ZUSAMMENFASSUNG

### 1. Einleitung

### 2. Zentrische Druckversuche

#### 2.1 Programm, Baustoffe und Probekörper

#### 2.2 Versuchseinrichtung

#### 2.3 Versuchsdurchführung

#### 2.4 Versuchsergebnisse

##### 2.4.1 Druckfestigkeit

##### 2.4.2 Bruchdehnung, E-Modul

##### 2.4.3 Arbeitslinien, Volumendehnung, Poisson'sche Zahl

##### 2.4.4 Bruchenergie

### 3. Exzentrische Druckversuche

#### 3.1 Programm, Baustoffe und Probekörper

#### 3.2 Versuchseinrichtung

#### 3.3 Versuchsdurchführung

#### 3.4 Versuchsergebnisse

##### 3.4.1 Druckfestigkeit

##### 3.4.2 Bruchdehnung

##### 3.4.3 Arbeitslinien

##### 3.4.4 Poisson'sche Zahl, Querschnittskrümmung

### 4. Zentrische Zugversuche

#### 4.1 Programm, Baustoffe und Probekörper

#### 4.2 Versuchseinrichtung

#### 4.3 Versuchsdurchführung

#### 4.4 Versuchsergebnisse

##### 4.4.1 Zugfestigkeit

##### 4.4.2 Bruchdehnung

##### 4.4.3 Arbeitslinien, E-Modul

##### 4.4.4 Tragverhalten von Faserbeton im gerissenen Zustand

## LITERATUR

## ANHANG

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Forschungsarbeit hatte zum Ziel, in einer vergleichenden Studie das bislang unbekannte Werkstoffverhalten von stahlfaserarmiertem Normalbeton unter schneller Belastung zu untersuchen.

Das Versuchsprogramm umfaßte folgende Parameter:

- Beanspruchungsart  
zentrischer Druck, exzentrischer Druck und zentrischer Zug
- Beanspruchungsgeschwindigkeit  
langsam  $\hat{=}$  quasistatisch; schnell  $\hat{=}$  rd.  $10^3$  bis  $10^4 \times \dot{\epsilon}_{\text{langsam}}$
- Resttragfähigkeit nach schneller Vorbelastung
- Faserart; Fasergehalt von 0 bis 1,5 Vol.-%

Folgende wesentlichen Ergebnisse wurden für alle Beanspruchungsarten erzielt:

- Durch eine Stahlfaserarmierung wird v.a. das Werkstoffverhalten im postkritischen Bereich, also im fallenden Ast des  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramms beeinflußt: Die Entfestigung ist geringer, die Duktilität ist größer als bei Normalbeton. Dies gilt sowohl für langsame als auch für schnelle Belastungsvorgänge.
- Eine schnelle Belastung erhöht die Festigkeit. Die Steigerungsrate der Festigkeit wird durch die Faserzugabe nicht signifikant beeinflußt.
- Im Gegensatz zu anderen Untersuchungen [9, 10] wird die statische Resttragfähigkeit von exzentrischen gedrückten Betonprismen durch eine schnelle Vorbelastung nicht erhöht, sondern sogar geringfügig vermindert.

## SUMMARY

It was the aim of the research work to study the material behaviour of steel fibre reinforced concrete subjected to dynamic loading which is yet unknown.

The test program comprised the following parameters:

- Type of loading  
axial compression, excentric compression, and axial tension
- Rate of loading  
slow  $\hat{=}$  quasi-static rate; fast  $\hat{=}$  appr.  $10^3$  to  $10^4$ -times of  $\dot{\epsilon}_{\text{slow}}$
- Residual strength after a dynamic preloading
- Type of fibre, fibre content between 0 and 1,5 Vol.%

The following principal results were obtained for all types of loading:

- Fibre reinforcement changes the material behaviour, especially in the post-critical region, i.e. in the descending branch of the stress-strain-line: the softening is less, ductility is higher than for plain concrete. This is valid for slow and dynamic loading as well.
- Dynamic loading increases the strength. The grade of increase is not significantly influenced by fibres.
- In contrary to other investigations [9, 10] the static residual strength of excentrically loaded specimens was not increased by a dynamic preloading, but slightly diminished.

## 1. EINLEITUNG

Zur Bemessung von Stahlbeton- und Spanntragwerken unter einer Reihe denkbarer Katastrophenbelastungen muß das Werkstoffverhalten des Betons unter schnell ablaufenden Beanspruchungen bekannt sein. Insbesondere interessiert dessen Arbeitsvermögen über den Gesamtbereich möglicher Verformungen.

Aus zahlreichen Versuchen an Normalbeton, der mit Stahlfasern armiert wurde, ist bekannt, daß hierdurch eine Steigerung des Arbeitsvermögens erzielt werden kann. Diese Ergebnisse wurden bei quasi-statischer Versuchsdurchführung gewonnen und sind demnach nicht ohne weiteres auf schnelle Belastungsvorgänge übertragbar.

Die Forschungsarbeit setzte sich deshalb zum Ziel, das Festigkeits- und Verformungsverhalten von Stahlfaserbeton unter schneller Belastung zu untersuchen. Das Hauptaugenmerk galt der Frage, ob durch schnelle Belastungsvorgänge die höhere Duktilität des Stahlfaserbetons möglicherweise vermindert wird.

Zur Beantwortung der Frage wurden langsame und schnelle Bruchversuche durchgeführt, wobei sich die Beanspruchungsgeschwindigkeiten markant, also um mehrere Zehnerpotenzen, unterscheiden. Es wurden die zentrische Druck-, exzentrische Druck- und zentrische Zugfestigkeit geprüft und die dabei auftretenden Verformungen untersucht. Weitere wesentliche Versuchsparemeter waren: Faserart und Fasergehalt.

## 2. Zentrische Druckversuche

### 2.1 Programm, Baustoffe und Probekörper

In dem folgenden Abschnitt der Arbeit wurde der Einfluß der Belastungsgeschichte auf das Festigkeits- und Verformungsverhalten von zentrisch gedrückten Betonzylindern untersucht. Hierbei wurden insgesamt 60 Versuche bei Variation der untenstehenden Parameter durchgeführt (s. Tab. 2.1)

Tab. 2.1 Versuchsp Parameter

Fasergehalt	$\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$ ; $\mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}$ ; $\mu_f = 0$
Faserart	glatte Fasern, Hakenfasern
Beanspruchungsrichtung	parallel bzw. normal zu Betonierichtung
Belastungsart	schnell, langsam

Es wurden Betone mit einem möglichst hohen und mittleren Fasergehalt ( $\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$  bzw.  $0,75 \text{ Vol.-%}$ ) untersucht. Höhere Fasergehalte als  $1,5 \text{ Vol.-%}$  führen i.a. dazu, daß die Betone schlecht zu verarbeiten sind bzw. sich keine gleichmäßige Faserverteilung erreichen läßt. Die verwendeten Faserarten stellen zwei typische Vertreter handelsüblicher Faserarten dar:

- 1.) die Wirex-Faser ( $l/d = 0,4/25 \text{ mm}$ ), eine glatte, nicht verformte Faser
- 2.) die Dramix-Faser ( $l/d = 0,5/30 \text{ mm}$ ), eine Faser mit aufgebogenen Enden (Hakenfaser).

Von Interesse war auch, inwieweit bei Faserbetonen eine Abhängigkeit des Festigkeits- und Verformungsverhaltens von der Beanspruchungsrichtung, normal bzw. parallel zur Betonierrichtung, besteht. Über eine derartige Abhängigkeit wurde in der Literatur berichtet. Hierbei wurden allerdings Untersuchungen an Proben durchgeführt, die in kleinen Schalungen stehend bzw. liegend betoniert worden waren. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob sich der gleiche Effekt auch bei solchen Proben einstellt, die aus einem massigen Betonblock normal bzw. parallel zur Betonierrichtung herausgebohrt wurden.

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte sowohl mit einer niedrigen, quasi-statischen als auch mit einer hohen Belastungsgeschwindigkeit. Die schnellen Versuche wurden mit der von der Versuchsanlage größtmöglichen Belastungsgeschwindigkeit durchgeführt.

Die zentrischen Druckversuche wurden für fünf Betone durchgeführt. Die Faserbetone unterschieden sich hinsichtlich der verwendeten Faserart (Hakenfaser bzw. glatte Faser) und ihres Fasergehaltes ( $\mu_f = 0; 0,75; 1,50 \text{ Vol.-%}$ ), s. Tab. 2.2.

Tab. 2.2: Übersicht über die Versuchsbetone

Beton I	glatte Fasern, $\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$
Beton II	glatte Fasern, $\mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}$
Beton III	Hakenfasern, $\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$
Beton IV	Hakenfasern, $\mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}$
Beton V	ohne Fasern



Sowohl die Faserbetone (FB) als auch der für Vergleichszwecke untersuchte Normalbeton (NB) besaßen die gleiche Betonzusammensetzung. Die Betone unterschieden sich lediglich durch die Menge der beigegebenen Stahlfasern und der zur Einstellung einer in etwa gleichen Frischbetonkonsistenz zugegebenen Menge an Betonverflüssiger. Eine Zusammenstellung der Betonzusammensetzung ist in der Anlage 2.1 aufgeführt.

Die Betone wurden in Holzschalungen ( $70 \times 40 \times 35 \text{ cm}^3$ ) gefüllt und mit Außenrüttlern verdichtet. Im Alter von sieben Tagen wurden aus den Betonblöcken Bohrkern  $\varnothing 80 \text{ mm}$  gezogen, 6 parallel und 6 normal zur Betonierrichtung. Die Bohrkern wurden anschließend auf eine Probekörperlänge von  $\approx 300 \text{ mm}$  geschnitten. Dann wurden die Endflächen planparallel geschliffen. Anschließend wurden die Proben bis zum Prüfalter von ca. 80 Tagen im Klima 20/65 gelagert.

Wie aus den Versuchsergebnissen zu ersehen ist, konnte durch Verwendung von Bohrkernen als Versuchskörper die Forderung nach geringer Abmessung bei gleichzeitig möglichst homogener Struktur befriedigend erfüllt werden. Die erreichten Variationskoeffizienten bei den Festigkeitswerten lagen je nach Belastungsart und Beanspruchungsrichtung für alle Versuche auf einem sehr niedrigen Niveau zwischen 2,13 und 3,37 %.

## 2.2 Versuchseinrichtung

Alle Versuche wurden auf der Hydropulsanlage (Fabrikat: Fa. Schenck) des Instituts durchgeführt. Für die Lastaufbringung wurde ein 630 kN-Kolben mit einem Nennhub von 100 mm in Verbindung mit einem servohydraulischen Ventil mit einer maximalen Leistung von 1700 l/min verwendet. Die Lasteinleitung erfolgte über gehärtete Stahlplatten, auf denen sich Zentrierhilfen befanden. Zur Vermeidung von Kantenpressung wurde am oberen Querhaupt des Prüfrahmens eine Kugelkalotte angebracht. Eventuell noch vorhandene Unebenheiten der geschliffenen Endflächen wurden durch dünne Kartonzwischenlagen ausgeglichen.

Die zylindrischen Probekörper sind mit drei Dehnungsmeßstreifen ( $l_0 = 60 \text{ mm}$ ) im Winkel von  $120^\circ$  zueinander zur Aufnahme der Längsdehnungen beklebt worden. Die Querdehnung wurde mit zwei sich gegenüberliegenden Dehnungsmeßstreifen ( $l_0 = 60 \text{ mm}$ ) gemessen. Zusätzlich wurden bei den Versuchen die Kraft, der Kolbenweg und die Belastungszeit aufgezeichnet.

Die Meßwert-Erfassung erfolgte mittels einer rechnergesteuerten Anlage, die eine praktisch gleichzeitige Abfrage aller Meßgeräte mit einer minimalen Taktzeit von einer Millisekunde ermöglicht. Die Daten werden auf Disketten gespeichert und zur weiteren Verarbeitung auf die institutseigene Rechenanlage übertragen.

Bild 2.1 vermittelt einen Überblick über den Prüfraum; in der Anlage 2.2 sind eine Probe vor der Belastung und eine Probe nach dem Bruchversuch abgebildet.

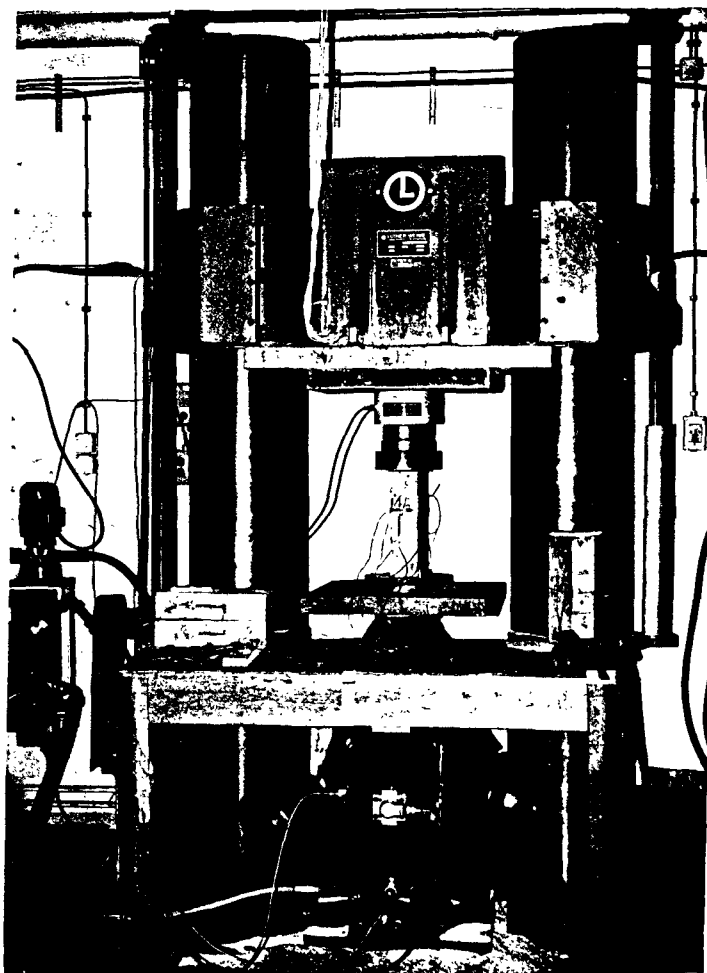


Bild 2.1: Versuchsaufbau

### 2.3 Versuchsdurchführung

Mit der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Versuchseinrichtung wurden das Festigkeits- und Verformungsverhalten der Betone bei unterschiedlicher Belastungsgeschichte ermittelt. Jeweils die Hälfte der Prüflinge wurden langsam zügig (quasi-statisch) bis zum Bruch, die übrigen Proben schnell zügig (dynamisch) bis zum Bruch beansprucht.

Die Steuerung der Versuche erfolgte nach dem Kolbenweg, d.h. die Kolbengeschwindigkeit bleibt während der Belastung annähernd konstant. Bei dieser Art der geregelten Belastung ergeben sich im Bereich niedriger Beanspruchung annähernd gleichbleibende Belastungs- und Dehngeschwindigkeiten. Beim Erreichen der Bruchlast fällt naturgemäß die Belastungsgeschwindigkeit auf Null ab, während die Dehngeschwindigkeit zunehmend anwächst. Die beschleunigte Dehnungszunahme wird u.a. dadurch hervorgerufen, daß nach dem Überschreiten der maximalen Last die im Prüfraumen gespeicherte Verformungsenergie frei wird und die Probe zusätzlich verformt. Zur Charakterisierung der Beanspruchungsgeschwindigkeiten wurde ein willkürlich gewählter Wert der Betonstauchung von 1 % gewählt. Hierfür ergaben sich die folgenden Mittelwerte der Spannungs- und Dehngeschwindigkeit:

- langsame Belastung:

$$\dot{\sigma} \approx 0,37 \text{ N/mm}^2 \text{ s}$$

$$\dot{\epsilon} \approx 0,000038 \text{ s}^{-1} \hat{=} 0,038 \text{ ‰ s}^{-1}$$

- schnelle Belastung:

$$\dot{\sigma} \approx 2200 \text{ N/mm}^2 \text{ s}$$

$$\dot{\epsilon} \approx 0,17 \text{ s}^{-1} \hat{=} 170 \text{ ‰ s}^{-1}$$

Die Dehngeschwindigkeiten der schnellen zu den langsamen Versuchen verhalten sich wie rd 4500 : 1, das Verhältnis  $\beta_{\text{dyn}}/\beta_{\text{stat}}$  beträgt ca. 6000 : 1.

In den Anlagen 2.3 und 2.4 sind die Zeitverläufe der Meßwerte für die langsame bzw. schnelle Beanspruchung beispielhaft für je zwei Versuche abgebildet. Man erkennt, daß bei der langsamen Belastung mit der Versuchsnummer SFB 022 die mittlere Längsdehnung nach Überschreiten der Bruchlast anwächst, schließlich jedoch wieder abfällt und dieses, obwohl der Kolbenweg weiterhin zunimmt. Die Erklärung hierfür ist darin zu sehen, daß der eigentliche Bruch des Betonzylinders ( $h/d \approx 3,75$ ) sich lokal begrenzt ausbildet und u.U. nicht von den Dehnungsmeßstreifen erfaßt wird, d.h., wenn sich die DMS nicht im Bereich des Betonausbruches befinden, zeigen sie die elastische Rückdehnung des Betons infolge abfallender Last an.

## 2.4 Versuchsergebnisse

### 2.4.1 Druckfestigkeit

Eine tabellarische Übersicht sämtlicher Druckfestigkeitswerte ist der Anlage 2.5 zu entnehmen. Die Streuung der Festigkeitswerte innerhalb einer Versuchsreihe ist ausgesprochen klein; die Variationskoeffizienten bewegen sich zwischen 2,13 und 3,37 Prozent.

Der Einfluß der vier Versuchsparameter (Faserart, Fasergehalt, Beanspruchungsrichtung und Belastungsgeschwindigkeit) auf die Betondruckfestigkeit ist mit Hilfe einer Varianzanalyse untersucht worden.

Als Ergebnis der **statistischen** Auswertung zeigt sich, daß für ein Signifikanzniveau von 95 Prozent sowohl Faserart und Fasergehalt als auch die Belastungsgeschwindigkeit einen Einfluß auf die Druckfestigkeit ausüben, nicht jedoch die Beanspruchungsrichtung. Für die folgenden Untersuchungen werden deshalb sämtliche Versuche an einer Betonart und mit einer Belastungsgeschichte zusammengefaßt betrachtet.

Es zeigte sich, daß die fünf untersuchten Betone, die im wöchentlichen Abstand hergestellt worden sind, trotz gleicher Sollzusammensetzung, vermutlich infolge Verarbeitungsungenauigkeiten, erhebliche Abweichung in den Festigkeitswerten aufwiesen. Dies gilt insbesondere für die Faserbetone mit Hakenfasern. Es wird deshalb darauf verzichtet, den alleinigen Einfluß von Faserart bzw. Fasergehalt auf die Druckfestigkeit näher zu untersuchen. Vielmehr wird der Frage nachgegangen, inwieweit unterschiedliche Fasergehalte bzw. Faserarten die Festigkeit von schnell belasteten Proben im Vergleich zur langsamen Beanspruchung beeinflusst. Im übrigen wird darauf verwiesen, daß auf Grund einer sehr umfangreichen Literaturstudie [1] ein signifikanter Einfluß der Stahlfasern auf die statische Druckfestigkeit nicht existiert.

Die Untersuchungen haben ergeben, daß durch eine schnelle Beanspruchung ( $\dot{\sigma} \approx 2200 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ) eine Festigkeitssteigerung von rd 20 bis 26 % je nach Betonart gegenüber der statischen Festigkeit ( $\dot{\sigma} \approx 0,37 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ) auftritt (siehe Anlage 2.6 und Bild 2.2)

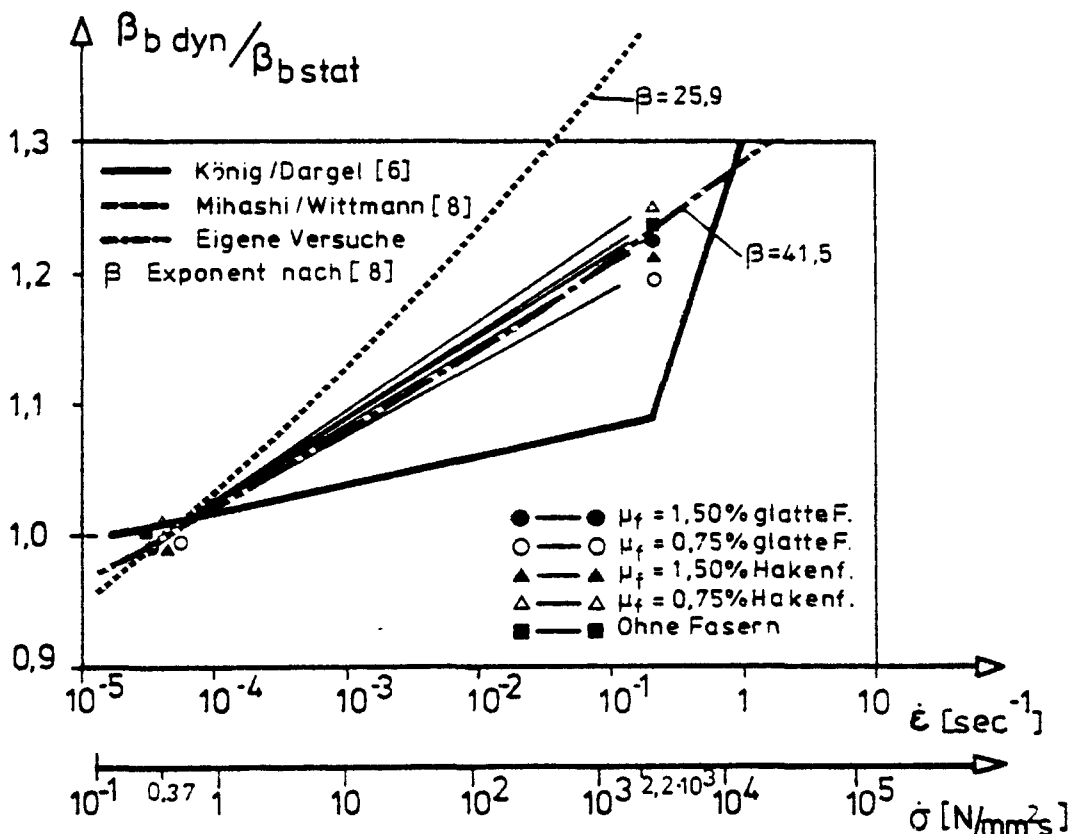


Bild 2.2: Bezogene Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit, Faserart und -menge

Aus der statischen Analyse geht ebenfalls hervor, daß bezüglich der Festigkeitssteigerung zwischen Normalbeton und Faserbeton - unabhängig vom Fasergehalt und Faserart - keine nachweisbaren Unterschiede vorhanden sind.

Die aus diesen Experimenten gewonnenen Werte für die Festigkeitssteigerung werden von der Literaturangabe nur zum Teil bestätigt. So berichten Suaris and Shah [2] über Versuchsergebnisse von Watstein [3], Takeda [4] und Cowell [5], deren Festigkeitssteigerungsraten gut mit den eigenen Werten übereinstimmen. König und Dargel [6] entwickeln aus ihnen vorliegenden Versuchsdaten einen formelmäßigen Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Dehnungsrate ( $\dot{\epsilon}$ ) in der Form:

$$\varphi = 1,10 + 9,06 \cdot 10^{-3} \cdot \ln(\dot{\epsilon}), \dot{\epsilon} \leq 0,191 \text{ s}^{-1} \quad (2.1)$$

$$\varphi = 1,30 + 13 \cdot 10^{-2} \cdot \ln(\dot{\epsilon}), \dot{\epsilon} > 0,191 \text{ s}^{-1} \quad (2.2)$$

$$\varphi = \beta_{\text{DYN}} / \beta_{\text{stat}}$$

Für die eigenen Versuche ergibt sich für  $\dot{\epsilon} = 0,17 \text{ s}^{-1}$  und der Formel (2.1) zu 1,084. Dieser Wert liegt erheblich unter dem experimentell gefundenen Wert  $\varphi = 1,226$ . Die beträchtliche Abweichung erklärt sich z.T. auch daraus, daß die Dehnungsraten der eigenen Versuche sehr nah an der von den obigen Autoren willkürlich gewählten Grenzen des Geltungsbereiches der Formel (2.1) befindet. Für Dehnungsraten größer als  $0,191 \text{ s}^{-1}$  wird nach der Formel (2.2) ein deutlich größerer Festigkeitsanstieg errechnet.

Mihashi und Wittmann [8] beschreiben den Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit durch eine Exponentialfunktion

$$\sigma/\sigma_0 = (\dot{\sigma}/\dot{\sigma}_0)^{1/\beta+1} \quad (2.3)$$

Mit  $\sigma_0$  und  $\dot{\sigma}_0$  werden die Bezugsfestigkeiten bzw. die Bezugsbelastungsgeschwindigkeiten der langsamen Belastung bezeichnet;  $\beta$  ist ein Materialparameter. Für Normalbeton wurde von ihnen  $\beta$  zu 25,9 bestimmt. Der Bestimmung dieses Wertes liegen zwei Versuchsreihen zugrunde, deren Belastungsgeschwindigkeiten  $17,3 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$  und  $0,018 \text{ N/mm}^2 \cdot \text{s}$  betrugen. Von den eigenen Versuchsergebnissen ausgehend, wurde für  $\beta$  ein Wert von 41,5 errechnet. In Bild 2.2 sind nach der Formel (2.3) für  $\beta = 25,9$  bzw. 41,5 errechneten Kurven eingezeichnet.

#### 2.4.2 Bruchdehnung, E-Modul

Neben der Festigkeit ist auch das Verformungsverhalten untersucht worden. Die Längsdehnungen wurden zum einen aus DMS-Messungen auf der Probekörperoberfläche, zum anderen aus dem Kolbenweg ermittelt.

Aus den Werten der DMS-Messung lassen sich sehr zuverlässige Angaben über die Probekörperverformungen bis etwa zur Höchstspannung im "aufsteigenden Ast" der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie machen. Nach Erreichen der Höchstlast  $F_U$  fällt dieses Meßsystem infolge fortschreitender Gefügezerstörung (Rißbildung) i.d.R. aus. Deshalb wurde der Kolbenweg zur Bestimmung der Längsverformung - und hier insbesondere im Bereich des "absteigenden Astes" - herangezogen. Da der gemessene Kolbenweg die Verformung des Gesamtsystems (Probekörper + Prüfrahmen + Zwischenlagepappe) darstellt,

waren Korrekturen vorzunehmen. Die Anlage 2.7 zeigt im ersten Bild die mittlere Längsdehnung des Probekörpers aus der DMS-Messung, im Bild ist der Kolbenweg in Abhängigkeit von der Last aufgezeichnet. Die Differenzdehnung  $\Delta\epsilon$  (EPS-Kolbenweg - EPS-DMS), die im Bild 3 zu erkennen ist, gibt an, welche Verformungsanteile von Prüfraumen und der Pappzwischenlage herrühren. Auffällig ist die beträchtliche Anfangsverformung, die zum großen Teil aus der Zusammendrückung der Pappscheiben stammt. Ab einer Last von ca. 20 kN bis zu einer Kraft, die etwa  $0,7 \cdot F_u$  entspricht, stellt sich ein nahezu lineares Verhältnis  $\Delta\epsilon$  zur Kraft ein. Es wird deshalb davon ausgegangen, daß durch die Steigung der Geraden, die Steifigkeit  $K$  des Systems charakterisiert wird. Mittels der für jeden Versuch gesondert bestimmten Systemsteifigkeit werden aus den Kolbenwegen die Probekörperverformungen wie folgt berechnet:

$$\text{Längsdehnung aus K-Weg} = \frac{\text{Kolbenweg}}{l_0} - \Delta\epsilon_{0,2} - \frac{F}{K} + \frac{0,2 \cdot F_u}{K}$$

Hierin bedeuten:

$\Delta\epsilon_{0,2}$ : EPS-Kolbenweg - EPS-DMS bei  $0,2 \cdot F_u$

$F, F_u$ : Last, Bruchlast

$K$ : Systemsteifigkeit

$l_0$ : Höhe des Probekörpers,  $l_0 = 300 \text{ mm}$

Die mit dieser Korrektur ermittelte Längsdehnung des Probekörpers ist im Bild 4 der Anlage 2.7 dargestellt. Die Dehnungen für Lasten unterhalb von  $0,2 F_u$  entstammen der DMS-Messungen. Die aus dem Kolbenweg errechneten Dehnwerte stimmen für weite Bereiche des "aufsteigenden Astes" der Spannungs-Dehnungsbeziehung sehr gut mit den Werten aus der DMS-Messung überein; für Lasten nahe der Bruchlast ergeben sich naturgemäß infolge Gefügauflockerungen stärkere Abweichungen - der Unterschied zwischen den Längsdehnungen im querdehnungsbehinderten und im nicht querdehnungsbehinderten Bereich des Probekörpers wächst an.



Zur Darstellung des abfallenden Astes steht nur die rechnerische Längsdehnung aus der Kolbenwegmessung zur Verfügung. Hierzu muß angemerkt werden, daß die Verformungen in diesem Teil der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie nicht unmittelbar mit den Dehnungen eines homogenen Körpers zu vergleichen sind, vielmehr wird hier die integrale Dehnung über die gesamte Prübekörperhöhe angegeben.

Die Anlage 2.8 zeigt die Gegenüberstellung der mittleren Bruchdehnungen der Versuchsbetone. Die Streuung der Einzelergebnisse ist deutlich größer als bei den Festigkeitswerten. Aus den vorliegenden Werten kann man nicht ableiten, daß Faserbetone sich hinsichtlich der Längsdehnung  $\epsilon_u$  bei der Bruchlast von Normalbeton unterscheiden. Diese Feststellung gilt sowohl für die langsamen als auch für die schnellen Versuche.

Durch eine schnelle Belastung stiegen i.d.R. die Bruchdehnungswerte an; die mittlere Erhöhung der Bruchdehnung betrug rd. 9 Prozent. Gleiches wurde von Cowell [5] beobachtet.

Die gemessenen mittleren Elastizitätsmodule der einzelnen Versuchsreihen sind in der Anlage 2.8 aufgeführt. Es wird hierbei zwischen dem Ursprungselastizitätsmodul  $E_{ur}$  (zwischen  $\sigma = 0$  und  $\sigma \approx 0,2 \cdot \sigma_{max}$ ) und dem Sekantenelastizitätsmodul  $E_{sek}$  (zwischen  $\sigma \approx 0,2 \sigma_{max}$  und  $\sigma \approx 0,7 \sigma_{max}$ ) unterschieden. Vergleicht man die Werte der langsamen Versuche mit denen der schnellen, so ist zu erkennen, daß sich die Ursprungselastizitätsmoduli infolge einer schnellen Beanspruchung nicht erhöhen, hingegen die Sekantenmoduli sich um ca. 14 Prozent vergrößern. Der Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit auf dem Sekantenmodul ist in Bild 2.3 dargestellt.

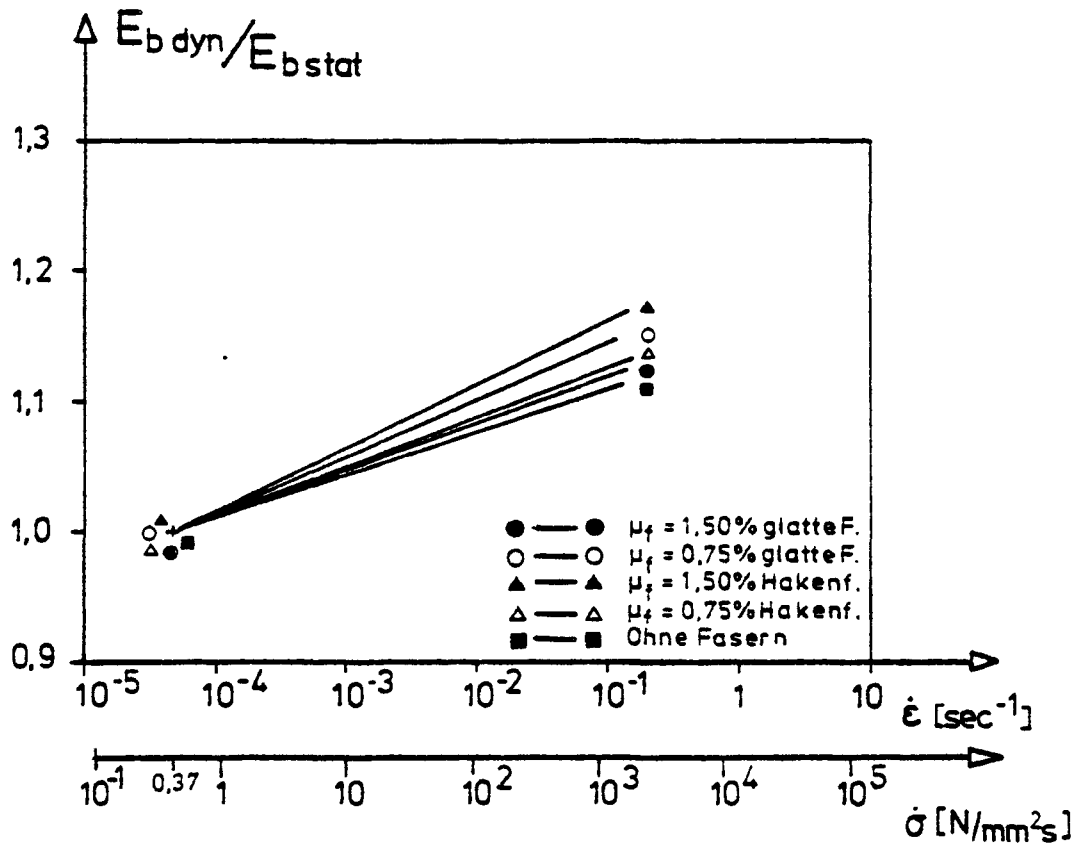


Bild 2.3 Relative Sekantenelastizitätsmoduli bei langsamer Versuchsdurchführung ( $E_{b \text{ stat}}$ ) und bei schneller Belastung ( $E_{b \text{ dyn}}$ )

Die Erscheinung, daß hohe Belastungsgeschwindigkeiten keine Auswirkung auf den Ursprungselastizitätsmodul haben, jedoch der Sekantenmodul deutlich anwächst - der Beton somit "versteift" - wurde bereits von Cowell [5] und Takeda [4] berichtet. So gibt Cowell für eine Belastungsgeschwindigkeit zwischen 675 N/mm<sup>2</sup>s und 19100 N/mm<sup>2</sup>s für den Sekantenmodul Erhöhungsfaktoren zwischen 1,17 und 1,28 an.

#### 2.4.3 Arbeitslinien, Volumendehnung, Poisson'sche Zahl

In den Anlagen 2.9 bis 2.13 sind die Spannungs-Dehnungs-Linien sämtlicher Einzelversuche aufgetragen. Die Längsdehnungswerte stammen hierbei aus den Messungen mit den Dehnungsmeßstreifen. Für geringere Beanspruchungen als die Bruchlast zeigen die Einzelkurven untereinander eine sehr gute Übereinstimmung. Es lassen sich hieraus recht genaue Angaben bezüglich der Steifigkeit der Betone im unterkritischen Bereich gewinnen. Deutlich wird aus den recht stark streuenden Kurvenverläufen nach Überschreiten der maximalen Spannung (Zylinderfestigkeit), daß die Gültigkeit  $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen, die aus DMS-Messungen abgeleitet werden, auf solche Beanspruchungsbereiche begrenzt ist, in denen noch keine Bruchvorgänge ablaufen. Die aus diesen Arbeitslinien ermittelten Werte der Elastizitätsmoduli und der Bruchdehnungen wurden bereits im Abschnitt 2.4.2 diskutiert.

Ein besonderes Interesse dieses Forschungsvorhabens galt der Frage, inwieweit eine Stahlfaserarmierung die Zähigkeit von auf Druck beanspruchten Beton vergrößert. Für langsame Beanspruchungen haben Shah et al [7] bereits gezeigt, daß die wesentliche Verbesserung nicht in einer Erhöhung der Druckfestigkeit, sondern vielmehr im deutlich weniger ausgeprägten Spröbruchverhalten zu sehen ist. Es war somit nötig, vollständige Arbeitslinien der Betone - also einschließlich des "absteigenden Astes" - gleichermaßen für langsame und schnelle Versuche aufzuzeichnen. In den Anlagen 2.14 bis 2.23 sind die Längsdehnungen - abgeleitet aus den Kolbenwegmessungen - in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$  für alle Versuche dargestellt.

Über die Größe der Bruchdehnungswerte aus diesen Messungen wurde bereits in Abschnitt 2.4.2 berichtet. Die Streubandbreite der Einzelkurven innerhalb einer Versuchsserie ist für den Bereich nach der Maximalspannung deutlich schmaler als bei den Kurven in den Anlagen 2.9 bis 2.13. In der Anlage 2.24 sind die für die jeweiligen Versuchsserien charakteristischen Spannungs-Dehnungslinien einander gegenübergestellt.

Die nahezu deckungsgleichen Kurvenverläufe bis zur Bruchlast zeigen, daß die Stahlfasern in diesem Bereich stoffliche Eigenschaften wie E-Modul und Bruchdehnung bei zentrischem Druck nur unwesentlich beeinflussen. Werden den Betonen jedoch größere Dehnzustände aufgezwungen, antworten die Faserbetone i. a. mit einem sehr viel gemäßigterem Lastabfall. Die Versuche mit den Hakenfasern sind trotz Normierung nur bedingt zu Vergleichszwecken heranziehbar, da deren Festigkeitsniveau erheblich von dem der anderen Versuche abweicht. Wichtig ist auch, daß das weniger spröde Bruchverhalten der Faserbetone auch für eine schnelle Belastung nachgewiesen werden konnten.

Die Bestimmung der Volumendehnung erfolgte aus den Messungen der Längs- und Querdehnungen (Anlage 2.14 bis 2.23). Sie ergibt sich unter Vernachlässigung der Glieder höherer Ordnung zu:

$$\epsilon_v = \epsilon_l + 2 \epsilon_q$$

Mit steigender Last verringert sich zunächst das Probekörpervolumen. Unmittelbar vor der Maximallast durchläuft es ein Minimum und wächst dann infolge der inneren Rißbildung rasch an. Die Minima der Volumendehnung wurden sowohl bei den schnellen als auch bei den langsamen Versuchen i.M. bei einer Last gemessen, die rd. 95 % der Bruchlast entsprach. Es wurden für die schnelle und für die langsame Belastung in etwa gleiche minimale Volumendehnungen zwischen -0,6 % und -1,0 % ermittelt. Die betragsmäßig geringen Volumendehnungen der Hakenfaserbetone erklären sich durch deren vergleichsweise niedrige Druckfestigkeit.

In den Anlagen 2.25 bis 2.29 ist die Poissonsche Zahl  $\mu = \varepsilon_1/\varepsilon_q$  in Abhängigkeit von der Spannung für sämtliche Versuche dargestellt. Für niedrige Beanspruchungszustände bleibt die Poissonsche Zahl annähernd konstant. Die Bruchphase kündigt sich durch einen raschen Anstieg von  $\mu$  an.

Die Ergebnisse unserer Untersuchung deuten darauf hin, daß eine schnelle Beanspruchung keinen Einfluß auf die Größe der Poissonschen Zahl im Bereich niedriger Betonspannungen  $\sigma \leq 0,4 \cdot \sigma_u$  ausübt. Diese Beobachtung steht einerseits im Widerspruch zu den Ergebnissen von Takeda [4], der für vergleichbare Belastungsgeschwindigkeiten eine Verkleinerung von  $\mu = 0,2$  auf  $\mu = 0,15$  infolge schneller Belastung festgestellt hat. Takeda erklärte diese Beobachtung mit einer Verringerung der Mikrorißbildung infolge schneller Belastung. Andererseits werden unsere Ergebnisse durch die von Paulmann und Steinert [9] berichteten bestätigt. Die schnelle Belastung beeinflusst die Poissonsche Zahl im Vergleich zur langsamen Belastung insofern, als das Abknicken der Kurvenverläufe zu größeren Werten erst bei höheren Spannungen eintritt.

#### 2.4.4 Bruchenergie

Zum Vergleich der Bruchenergiewerte werden die Flächeninhalte unterhalb der Arbeitslinien bestimmt. Je größer die Fläche ist, umso größer ist die Deformationsenergie und umso duktiler verläuft der Bruchvorgang.

Eine vergleichende Betrachtung der Bruchenergie von Faserbetonen und Normalbetonen setzt voraus, daß deren Druckfestigkeiten nicht weit voneinander abweichen. Aus diesem Grunde beschränkt sich der Vergleich auf die Faserbetone mit den glatten Fasern und dem Beton ohne Fasern. Die Flächeninhalte wurden bis zu einer maximalen Dehnung von  $\epsilon = -8 \%$  bestimmt. In der Tabelle 2.3 sind die relativen Bruchenergien angegeben, wobei jeweils die Werte des Normalbetons zu 100 % gesetzt wurden.

Tabelle 2.3: Vergleich der Bruchenergien von Faserbeton und Normalbeton

$\mu_f$	schnelle Belastung	langsame Belastung
0	100 %	100 %
0,75 %	119,1 %	140,5 %
1,50 %	149,6 %	

Es ist zu erkennen, daß die Bruchenergie durch die Stahlfasern erheblich gesteigert wird. Von Bedeutung ist auch, daß die Erhöhung der Zähigkeit infolge Faserzugabe bei einer schnellen Beanspruchung des Betons nicht verlorenght.

### 3. Exzentrische Druckversuche

#### 3.1 Programm, Baustoffe und Probekörper

Der folgende Abschnitt befaßt sich mit der Untersuchung der exzentrischen Druckfestigkeit von Faserbeton in Abhängigkeit unterschiedlicher Belastungsgeschichten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierzu insgesamt 63 Betonprimen exzentrisch auf Druck belastet. Eine Übersicht der Versuchsparameter ist in der Tabelle 3.1 gegeben.

Tabelle 3.1: Versuchsprogramm, Versuchsparameter

Versuchsparameter	Serie B I	Serie B II
Faserart	glatte Fasern	Hakenfasern
Fasergehalt	$\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}; \mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}; \mu_f = 0$	
Belastungs- geschichte	1. langsam zügig bis zum Bruch 2. schnell zügig bis zum Bruch 3. schnelle Vorbelastung, anschließend langsam zügig bis zum Bruch	
Anz. d. Versuche	$3 \times 3 \times 3 = 27$	$3 \times 3 \times 4 = 36$

Aus den drei Betonen einer Versuchsserie (B I, B II) wurden an einem Tag insgesamt 6 Blöcke hergestellt. Die Verdichtung erfolgte mit Schalungsrüttlern. Die Blöcke wurden die ersten 7 Tage unter feuchten Tüchern und dann anschließend im Klima 20/65 bis zur Prüfung (Alter: Serie B I  $\approx$  90 Tage; B II  $\approx$  330 Tage) gelagert. Die Zusammensetzung der Betone ist aus Anlage 3.1 ersichtlich.

Die prismatischen Probekörper mit den Abmessungen 70 x 120 x 300 mm<sup>3</sup> wurden aus den Blöcken herausgesägt. Die Belastungsflächen wurden planparallel geschliffen.

Bei der Durchführung der Versuche der Serie B I zeigte sich, daß Faserbetonprismen in der Lage sind, sehr große Querschnittverdrehungen - gleichbedeutend mit sehr großen Druckdehnungen - auszuführen, wobei die Last nahezu unverändert hoch bleibt. Dies führt in einigen Fällen, vornehmlich beim Beton mit dem hohen Fasergehalt ( $\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$ ), dazu, daß selbst der Dehnzustand beim Erreichen der Bruchlast nicht aus den Messungen der DMS ermittelt werden konnte. Die Dehnungsmeßstreifen wurden durch die in der äußersten Randfaser der Druckzone auftretenden Risse zerstört.

Da aber gerade in Bereichen nach Überschreiten der Bruchlast die Faserbetone ein deutlich vom Normalbeton abweichendes Tragverhalten zeigten, mußte eine Meßmethode entwickelt werden, die auch für ausgeprägtere Dehnzustände sichere Meßwerte liefert. Hierbei erwies die gleichzeitige Erfüllung der Forderungen, daß die Dehnungsmessung bei stoßartiger Belastung und für Dehnzustände mit bereits eingetretener lokaler (oberflächlicher) Betonzerstörung zu erfolgen hat, sich als schwierig.

Das für die weiteren exzentrischen Druckversuche (Serie B II) entwickelte Meßverfahren besteht im wesentlichen darin, daß durch vier induktive Weggeber (Typ: W 10 Tk, Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik) die relativen Vertikalverschiebungen und Verdrehungen der beiden Lastverteilungsplatten gemessen wurden. An die Lastverteilungsplatten wurden seitlich Befestigungsvorrichtungen geschraubt, die durch Verwendung von Gelenkösen einen kugelgelenkigen Anschluß der Weggeber ermöglichten (s. Bild 3.1).

Aus den mit den Weggebern gemessenen Verformungen konnten dann, unter Berücksichtigung der geometrischen Verhältnisse, die Längsdehnungen und die Querschnittkrümmungen errechnet werden. Bei der Beurteilung der auf die Art ermittelten Dehnungswerte darf nicht vergessen werden, daß es sich um eine über die gesamte Probekörperhöhe erfaßte "integrale" Dehnung handelt, deren absolute Größe sicher auch von den vorliegenden Probekörperabmessungen abhängt.



### 3.2 Versuchseinrichtung

Die Belastungseinrichtung und die Meßwerterfassungsanlage sind identisch mit denen, die für die zentrischen Druckversuche benutzt wurden (s. Abschn. 2.2).

Die Lasteintragung erfolgte über Linienlager aus 4 mm breiten Aluminiumstreifen (Serie B I) bzw. Stahlstreifen (Serie B II; zur Ermöglichung größerer Querschnittsverdrehungen). Zur Lastverteilung dienten gehärtete und beidseitig geschliffene Stahlplatten (70 x 120 x 30 mm<sup>3</sup>). Die Lastexentrität wurde so gewählt, daß bis unmittelbar vor Erreichen der maximalen Belastung nur Druckspannungen in der Probe auftreten.

Die Proben wurden sowohl auf der lastfernen Seite (Zugseite) als auch auf der lastnahen Seite (Druckseite) mit je einem Dehnungsmeßstreifen ( $l = 60$  mm) in Lastrichtung mittig beklebt. Zusätzlich waren auf der Druckseite unterhalb und oberhalb des Längsdehnungs-DMS je ein DMS ( $l = 30$  mm) zur Erfassung der Querdehnung aufgebracht (s. Bild 3.1).

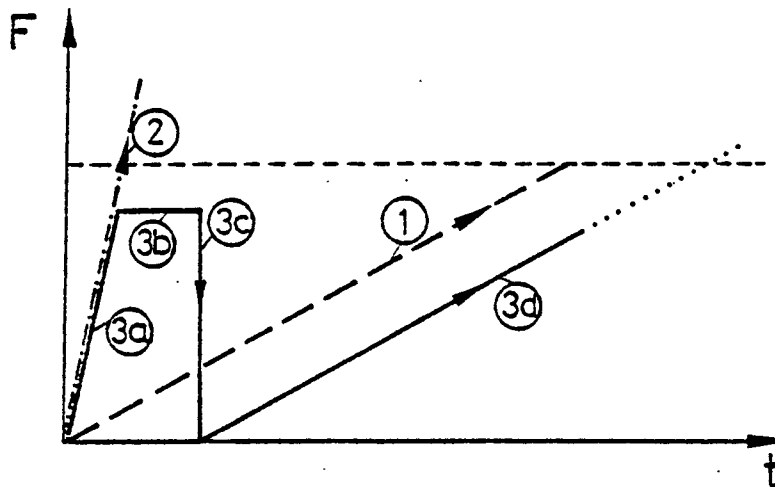


Bild 3.1: Probekörper mit Meßvorrichtung

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten und vergleichenden Untersuchungen konnte durch diese Meßmethode das vom Normalbeton stark abweichende Tragverhalten des Faserbetons im Bereich großer Dehnungen deutlich aufgezeigt werden.

### 3.3 Versuchsdurchführung

Die Belastung der Proben wurde kolbenweggesteuert durchgeführt. Die drei untersuchten Belastungsgeschichten sind im Bild 3.2 schematisch dargestellt.



#### Last-Zeit-Kurven:

- ① langsame zügige Belastung bis zum Bruch (gem. DIN 1048)
- ② schnelle zügige Belastung bis zum Bruch
- ③
  - a) schnelle zügige Belastung bis zu einem bestimmten hohen Lastniveau
  - b) Halten der Last über unterschiedliche Zeitintervalle
  - c) Entlastung der Probekörper
  - d) langsame zügige Belastung bis zum Bruch

Bild 3.2: Schematische Darstellung der Belastungsgeschichten

Die in den Versuchen erzielten Beanspruchungsgeschwindigkeiten wurden für eine Betonrandstauchung von 1 % ermittelt. Es ergaben

sich hierbei für die mittlere Betonspannung folgende Mittelwerte der Spannungsraten:

- langsame Belastung:

$$B \text{ I: } \dot{\sigma} = 0,17 \text{ [N/mm}^2\text{s]}$$

$$B \text{ II: } \dot{\sigma} = 0,23 \text{ [N/mm}^2\text{s]}$$

- schnelle Belastung:

$$B \text{ I: } \dot{\sigma} = 2090 \text{ [N/mm}^2\text{s]}$$

$$B \text{ II: } \dot{\sigma} = 4020 \text{ [N/mm}^2\text{s]}$$

- langsame Belastung nach schneller Vorlast:

$$B \text{ I: } \dot{\sigma} = 0,21 \text{ [N/mm}^2\text{s]}$$

$$B \text{ II: } \dot{\sigma} = 0,25 \text{ [N/mm}^2\text{s]}$$

Die schnelle Vorbelastung der Proben wurde innerhalb von ca. 15 Millisekunden aufgebracht und dann über ca. 50 ms gehalten. Die Höhe der Vorbelastung ist für die einzelnen Versuche aus der Anlage 3.4 ersichtlich. Die Bilder in den Anlagen 3.2 und 3.3 vermitteln einen Eindruck von der sehr unterschiedlichen Art und Ausbildung der Biegedruckbrüche beim Normalbeton und beim Faserbeton.

### 3.4 Versuchsergebnisse

#### 3.4.1 Exzentrische Druckfestigkeit

Bei der Versuchsdurchführung konnte beobachtet werden, daß unmittelbar vor Erreichen der Bruchlast  $F_u$  bereits lokale Betonzerstörungen (Ausbrechen der Druckzone, Aufreißen der Zugzone) auftraten, die die Ergebnisse der Dehnungsmessung mittels DMS für fragwürdig erscheinen lassen. Für die Berechnung der mittleren Druckfestigkeit bei ausmittiger Belastung ist der Dehnzustand gewählt worden, bei dem die o.g. verfälschenden Einflüsse bezüglich der Dehnungsmessung

gerade noch nicht auftraten. Daher wurde grundsätzlich die Maximalkraft auf die Querschnittsfläche der Druckzone bei  $\approx 0,9 F_u$  bezogen.

In der Anlage 3.4 sind die Einzelergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen dargestellt. Bei den Festigkeitswerten der langsamen Versuche nach schneller Vorbelastung ist zusätzlich die Höhe der jeweiligen Vorlast angegeben.

Ein Vergleich des Einflusses der Belastungsgeschichte auf die Druckfestigkeit ausmittig beanspruchter Faserbetone ermöglicht die Anlage 3.5. Aufgrund einer statistischen Untersuchung (Varianzanalyse) lassen sich für ein Signifikanzniveau von 95 % folgende Aussagen treffen:

- Durch eine schnelle Belastung wird im Mittel für alle untersuchten Betone eine Steigerung der exzentrischen Druckfestigkeit gegenüber der Festigkeit bei langsamer Beanspruchung von ca. 20,4 % erreicht.
- Ein signifikanter Einfluß der Faserart und des Fasergehaltes auf die Größe der Festigkeitssteigerung durch eine schnelle Belastung konnte nicht nachgewiesen werden.
- Eine schnelle Vorbelastung mit einem mittleren Vorlastniveau  $\alpha = 0,94 \cdot \beta_{D, \text{langsam}}$  führt zu einer Verringerung der Belastbarkeit langsam ausmittig belasteter Betonprismen auf im Mittel 98,5 % der mittleren Betonfestigkeit ausschließlich langsam beanspruchter Proben. Ein Einfluß von Faserart und Fasergehalt auf die Festigkeitsminderung kann statistisch nicht nachgewiesen werden.

### 3.4.2 Bruchdehnung

Die in den Anlagen 3.6 und 3.7 zusammengefaßten Bruchdehnungswerte resultieren aus den Messungen mit den Dehnungsmeßstreifen. Aus den bereits in den Abschnitten 3.2 und 3.4.1 näher ausgeführten Gründen ergibt sich eine im Vergleich zu den Festigkeitswerten größere Streuung der Meßergebnisse. Besonders große Abweichungen der Einzelergebnisse innerhalb einer Versuchsreihe wurden bei den der Vollständigkeit halber mit aufgeführten Zugbruchdehnungen ermittelt, da i.d.R. auf der Zugseite die Dehnungen im Bereich der Bruchlast besonders stark zunehmen bzw. bereits die Zugzone eingerissen ist.

Ein Vergleich der Bruchdehnung auf der Druckseite zeigt:

- Die Bruchdehnungswerte bei den schnell belasteten Proben liegen im Mittel bei allen Versuchen um ca. 8.9 % über denen, die bei den langsamen Belastungsversuchen gemessen wurden. Unterschiede zwischen den einzelnen Betonen können wegen der großen Versuchsstreuung nicht aufgezeigt werden.
- Die durch eine schnelle Vorlast beanspruchten Proben weisen im Mittel eine um 5,9 % höhere Bruchdehnung bei der langsamen Belastung bis zum Bruch auf als die nicht vorbelasteten Proben; ein Einfluß von Faserart und Fasergehalt konnte wegen der starken Streuung der Versuchswerte nicht gesichert nachgewiesen werden.

### 3.4.3 Arbeitslinien

In den Anlagen 3.8 bis 3.16 (Serie: B I) und den Anlagen 3.17 bis 3.25 (Serie: B II) sind die Last-Dehnungslinien sämtlicher Einzelversuche aus den Messungen mit den Dehnungsmeßstreifen (DMS) und für die Serie B II zusätzlich aus den Messungen mit den Weggebern (WG) abgebildet.

Es sind beide Arten der Last-Verformungsbeziehung dargestellt worden, weil zum einen die Kurven aus den DMS-Messungen bis zur Höchstlast das Verformungsverhalten genauer beschreiben, damit eine bessere Abschätzung der Steifigkeitsverhältnisse in diesem Beanspruchungsbereich ermöglicht wird, zum anderen weil durch die aus den Weggebermessungen resultierenden Kurven sowohl den "aufsteigenden Ast" als auch den "absteigenden Ast" der Arbeitslinie beschreiben.

Insgesamt kann festgestellt werden, daß i.d.R. eine sehr gute Übereinstimmung aller Einzelkurven innerhalb einer Meßreihe besteht; bei den WG-Kurven nach Überschreiten der Bruchlast ergibt sich naturgemäß eine größere Streuung.

Für die langsamen Versuche nach schneller Vorlast ist aus Gründen der Übersichtlichkeit auf die Darstellung der Last-Dehnungslinien für die schnelle Vorbelastung verzichtet worden. Die Kurven, die aus den WG-Messungen resultieren, beginnen nicht im Ursprung, weil die für die Berechnung der Dehnungswerte benötigte Querschnittsverkrümmung anfänglich gleich Null ist.

Für die Untersuchung des Einflusses einer hohen Beanspruchungsgeschwindigkeit auf den Verlauf der Last-Verformungslinien exzentrisch beanspruchter Betone sind in den Anlagen 3.26 bis 3.31 jeweils charakteristische Kurvenverläufe der Versuchsreihen einander gegenübergestellt worden. Hierbei zeigt sich folgendes:

- Durch eine schnelle Belastung bleibt die Anfangssteigung der Last-Dehnungslinie vergleichsweise unbeeinflusst; der geradlinige Teil der Arbeitslinie reicht bis in Bereiche höherer Lasten (siehe Kurven aus DMS-Messungen).
- Nach Überschreiten der maximalen Last (absteigender Ast) weisen die Kurven für die schnelle Beanspruchung für einen vorgegebenen

Dehnungszustand immer eine höhere Last auf als die Kurven für den gleichen Beton aus den langsamen Versuchen, d.h., der versteifende Effekt einer schnellen Beanspruchung erstreckt sich über den gesamten Bereich des absteigenden Astes der Last-Verformungslinie.

Eine schnelle Vorlast bewirkt, daß bei einer sich anschließenden langsamen Belastung die Last-Dehnungslinie anfangs eine geringere Steigung aufweist als die F- $\epsilon$ -Linie eines nicht vorbelasteten langsam beanspruchten Betons; der geradlinige Teil der Arbeitslinie ist nach schneller Vorbelastung länger. Am Beispiel der Anlage 3.32 soll das Phänomen verdeutlicht werden, daß die Kurven für vorbelastete und nicht vorbelastete Proben im Bereich des absteigenden Astes den gleichen Verlauf nehmen.

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Fasergehaltes auf den Verlauf der Arbeitslinie sind in den Anlagen 3.34 und 3.35 aus der Serie B II je Fasergehalt eine Last-Dehnungslinie einander gegenübergestellt. Es wurden hierfür Versuche ausgewählt, bei denen in etwa die gleiche Betonfestigkeit ermittelt wurde.

Aus der Gegenüberstellung ist ersichtlich, daß

- der Fasergehalt auf den Verlauf der Arbeitslinie bis zum Erreichen der Bruchlast keinen Einfluß hat.
- mit zunehmendem Fasergehalt der Lastabfall nach Überschreiten der maximalen Last allmählicher verläuft, d.h., der Bruch ist weniger spröde.
- auch bei einer schnellen Belastung der Bruch von Faserbeton duktiler verläuft als bei Normalbeton.

#### 3.4.4 Poisson'sche Zahl, Querschnittskrümung

In den Anlagen 3.8 bis 3.16 (B I) und den Anlagen 3.35 bis 3.43 (B II) ist die Poisson'sche Zahl  $\mu$  aller Einzelversuche in Abhängigkeit von der Belastung aufgetragen. In den Anlagen 3.26 bis 3.28 (B I) und den Anlagen 3.44 bis 3.46 (B II) sind die Poisson'schen Zahlen der schnellen Versuche denen der langsamen Versuche gegenübergestellt.

Die Poisson'sche Zahl bleibt für niedrige Beanspruchungszustände in etwa konstant, ab einer Last, entsprechend etwa 50 % der Bruchlast, steigt  $\mu$  stark zu höheren Werten an. Insgesamt muß festgestellt werden, daß die Poisson'sche Zahl auch innerhalb einer Versuchsreihe (d.h., für eine bestimmte Belastungsgeschwindigkeit und den gleichen Beton) einer starken Versuchsstreuung unterliegt. Die Werte bewegen sich innerhalb einer Bandbreite von 0,1 bis 0,2.

Bei den Vorlastversuchen wächst die Poisson'sche Zahl während der schnellen Vorbelastung i.d.R. zunächst stark an. Bei der Zwischenentlastung steigen die  $\mu$ -Werte weiterhin an, was daraufhin deutet, daß die Längsdehnungen zu einem größeren Teil reversibler als die Querdehnungen sind. Während der Wiederbelastung verkleinert sich  $\mu$  anfänglich, um dann zu sehr großen Werten hin abzuknicken.

Ein Einfluß der Belastungsgeschwindigkeit ist insofern zu erkennen, daß das Abknicken zu größeren Werten im Mittel bei einer erst höheren Last eintritt.

Ein Einfluß des Fasergehaltes und der Faserart auf die Größe der Poisson'schen Zahl konnte - wohl auch wegen der starken Versuchsstreuung - nicht aufgezeigt werden.

Die Krümmungswerte  $\chi$  weisen i.w. die gleichen Merkmale wie die Kraft-Dehnungslinien auf, so daß sich eine eingehende Diskussion erübrigt.



#### 4. Zentrische Zugversuche

##### 4.1 Programm, Baustoffe und Probekörper

Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten zentrischen Zugversuche sollen einen Beitrag zur Klärung des Trag- und Verformungsverhaltens von Normal- und Faserbeton unter hoher Zugbeanspruchungsgeschwindigkeit leisten. Es ist von Faserbetonen bekannt [7, 11], daß sie auch nach Auftreten eines makroskopischen Risses in der Lage sind, Kräfte rißüberbrückend zu übertragen. Es stellte sich somit die Frage, inwieweit diese Eigenschaften auch bei schneller Belastung erhalten bleibt. Hierzu wurden Messungen des Kraftabfalls in Abhängigkeit von der Rißöffnung durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die untersuchten Versuchsparameter.

Tab. 4.1: Versuchsprogramm, Versuchsparameter der zentrischen Zugversuche

Versuchsparameter	Serie C I	Serie C II
Faserart	glatte Fasern	Hakenfasern
Fasergehalt	$\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$ , $\mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}$ , $\mu_f = 0$	
Belastungs- geschwindigkeit	1. langsam zügig bis zum Bruch 2. schnell zügig bis zum Bruch	
Anz. d. Versuche	$3 \times 2 \times 3 = 18$	$3 \times 2 \times 3 = 18$

Bezüglich der Herstellung, Verdichtung und Lagerung der Versuchsbetone siehe Abschnitt 3.1. Die Zusammensetzung der Betone ist aus der Anlage 4.1 ersichtlich. Die an Begleitproben ermittelten Druck- und Spaltzugfestigkeiten sind in der Anlage 4.2 aufgeführt. Die Prüfungen erfolgten in einem Betonalter von 220 Tagen (C I) bzw.  $\approx 230$  Tagen (C II).

Die zylindrischen Probekörper mit den Abmessungen  $d/h = 80/80$  mm wurden aus Blöcken herausgebohrt. Die Stirnflächen wurden planparallel geschliffen. Etwa zwei Stunden vor Versuchsdurchführung wurden an den Stirnenden Aluminiumblöcke, die eine Ankopplung an die Belastungseinheit ermöglichten, mit Hilfe einer Zentriervorrichtung geklebt (Kleber: Technovit, Fa. Kalzer & Co. GmbH, 6380 Bad Homburg).

#### 4.2 Versuchseinrichtung

Prüfrahmen und Meßwerterfassungsanlage entsprechen denen, die bei den Druckversuchen benutzt wurden (siehe Abschnitt 2.2). Anstelle des 630 kN-Kolbens wurde jedoch ein Kolben mit einer maximalen Zugkraft von 100 kN in Verbindung mit einem Hydraulikventil mit einer Durchflußleistung von 600 l/min. eingesetzt. Für die Ankopplung des Prüflings an die Belastungseinheit war aus zwei Gründen eine besonders steife Konstruktion zu wählen:

1. Die Ankopplung mußte für dynamische Belastungsvorgänge geeignet sein.
2. Die Konstruktion sollte sich möglichst wenig verformen, da sonst infolge deren elastischer Rückverformung beim Erreichen der Höchstlast der Prüfling schlagartig zerrissen würde und somit bei den Faserbetonen der allmähliche Abfall der Tragfähigkeit mit zunehmender Rißbreite nicht zu verfolgen wäre.

Die für die Versuche entwickelte Konstruktion bestand i.w. aus zwei Gelenkösen, die mittels Adapterplatten fest mit dem Prüfrahmen bzw. den Kolben verschraubt waren, und zwei Verankerungselementen, die durch einen Bolzen  $\varnothing 30$  mm mit den Gelenkösen verbunden waren. An die Anker wurde dann der mit den beiden Aluminiumblöcken verklebte Probekörper mittels hochfester Schrauben

An allen Proben wurde die Längsdehnung mit drei in Winkel von  $\varnothing$  20 mm fest verschraubt. Diese Konstruktion ermöglichte eine volle kardanische Aufhängung des Prüflings bei gleichzeitig hoher Steifigkeit. Bild 4.1 zeigt die Anschlußkonstruktion.

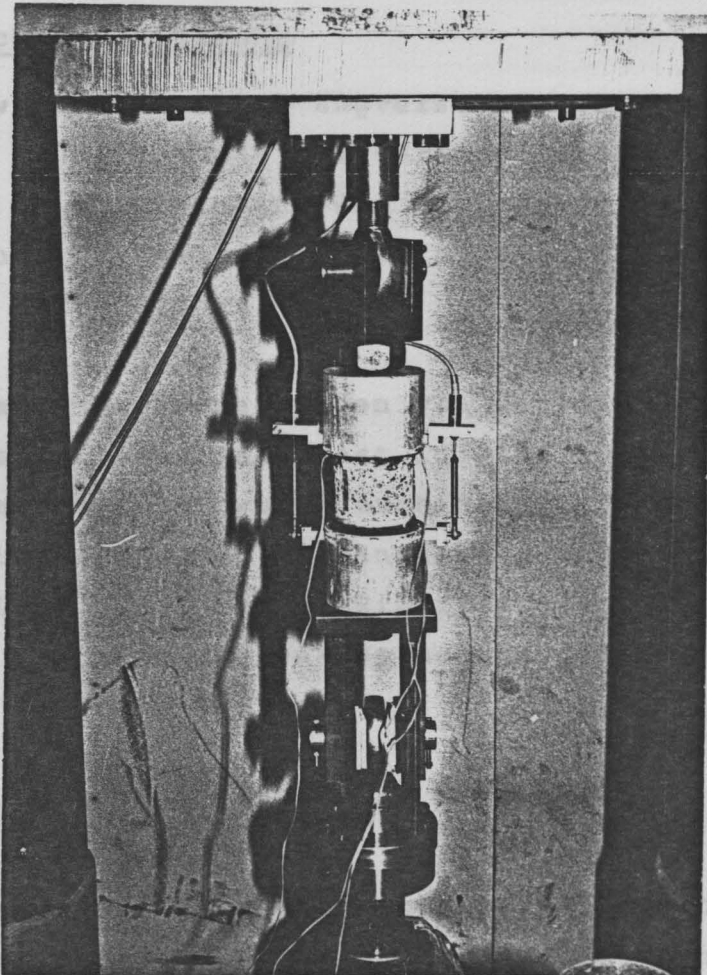


Bild 4.1: Zugprobe mit Meßvorrichtung im Prüffrahmen

Um die Verminderung der Tragfähigkeit von Faserbeton im gerissenen Zustand in Abhängigkeit von der Rißöffnung verfolgen zu können, wurden seitlich an die Aluminiumblöcke zwei sich gegenüberstehende Weggeber (Typ: W 1, Fa. Hottinger-Baldwin-Meßtechnik, Darmstadt) angebracht. Die von den Weggebern gemessene Verformung kann nach dem Reißen der Probe in guter Näherung als die Rißbreite angesehen werden, da alle anderen Verformungsanteile, verglichen mit der Rißbreite, klein sind.

An allen Proben wurde die Längsdehnung mit drei im Winkel von  $120^\circ$  zueinander aufgeklebten Dehnungsmeßstreifen ( $l_0 = 30 \text{ mm}$ ) gemessen. Bei einigen Prüflingen wurde zusätzlich die Querdehnung mittels DMS bestimmt.

#### 4.3 Versuchsdurchführung

Zunächst wurde bei allen Zugversuchen eine geringe Vorlast aufgebracht, um selbst das nur geringe Spiel in der Anschlußkonstruktion zu eliminieren. Die Vorlast wurde durch Handregulierung aufgebracht. Der weitere Belastungsvorgang wurde dann kolbenweggesteuert durchgeführt.

Die langsamen Versuche wurden von der Geschwindigkeit so eingestellt, daß die maximale Last in etwa 60 sec erreicht wurde. Bei den Faserbetonen wurde auch nach Erreichen der Reißlast der Versuch mit konstanter Kolbengeschwindigkeit fortgesetzt, bis sich die Last trotz großer Reißöffnung nur noch sehr langsam verringerte. Die mittlere Beanspruchungsgeschwindigkeit für die langsamen Versuche betrug:

$$\dot{\sigma}_{\text{langsam}} \approx 0,05 \text{ N/mm}^2\text{s}$$

Die Lastanstiegsrate für die schnellen Versuche wurde so gewählt, daß eine ausreichend große Zahl von Meßwerten vom PCS-Rechner (schnellste Taktfolge: 1 ms) erfaßt werden konnte. Es wurde deshalb eine Belastungsdauer bis zur Bruchlast von etwa 20 ms festgelegt. Die sich hieraus ergebende Belastungsgeschwindigkeit betrug etwa

$$\dot{\sigma}_{\text{schnell}} \approx 200 \text{ N/mm}^2\text{s}$$

Sie betrug damit den rd.  $4 \cdot 10^3$ -fachen Wert der langsamen Belastung.

Es zeigte sich während der Versuchsdurchführung, daß die gewählte Probekörperform und die verwendete Klebetechnik sehr gut für Zugprüfungen geeignet sind. Es wurden nämlich stets Betonbrüche erreicht, deren Lage einer zufälligen Verteilung über die Länge der Probekörper unterlagen. In der Anlage 4.3 werden beispielhaft drei Fotos von geprüften Zugproben gezeigt.

#### 4.4 Versuchsergebnisse

##### 4.4.1 Zugfestigkeit

In der Anlage 4.4 sind die Zugfestigkeitswerte sämtlicher Einzelversuche zusammengestellt. Anlage 2.4 enthält außerdem Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen, sowie das prozentuale Verhältnis des Mittelwertes für die schnellen Versuche zu dem für die langsamen Versuche.

Bei einer ersten Bewertung der Festigkeitsergebnisse wurde die allgemein bekannte Tatsache bestätigt, daß die Betonzugfestigkeit beträchtlich mehr als die Druckfestigkeit streut. So liegen die Variationskoeffizienten für die langsamen und schnellen Versuche mit  $V_l = 8,8 \%$  und  $V_s = 10,5 \%$  erheblich über den vergleichbaren Werten der Druckversuche. Um statistisch gleichwertig abgesicherte Festigkeitswerte wie bei den Druckversuchen zu erhalten, hätte die Anzahl der Zugversuche für jeden untersuchten Parameter mindestens verdoppelt werden müssen. Dies ließ sich jedoch aus Kostengründen nicht realisieren.

Als Ergebnis der Zugfestigkeitsuntersuchung kann man zusammenfassend berichten, daß - bis auf eine Ausnahme - eine schnelle Beanspruchung eine deutliche Erhöhung der Festigkeit bewirkt. So wurden beispielsweise für die Serie C I für alle untersuchten Betone immer Steigerungsraten von über 25 % ermittelt. Nur in einem Fall (Serie C II,  $\mu_f = 0$ ) liegt der Mittelwert der Zugfestigkeit der schnellen Versuche unter dem der langsamen Versuche.

Die in einer Literaturstudie von Körmeling, et al [12] berichteten Festigkeitserhöhungen bei Normalbetonen infolge einer stoßartigen Belastung betragen für die in diesem Forschungsvorhaben erzielten Beanspruchungsgeschwindigkeiten rd. 40 %.

#### 4.4.2 Bruchdehnung

In der Anlage 4.4 sind die aus den DMS-Messungen resultierenden Bruchdehnungswerte sämtlicher Einzelversuche wiedergegeben. Die Streuung dieser Werte innerhalb einer Versuchsreihe (3 Versuche je Versuchsparameter) ist noch größer als die der Festigkeitswerte. Diese Beobachtung deckt sich mit denen in der Literatur berichteten (siehe z.B. [12]).

Betrachtet man die Ergebnisse aller Versuchsreihen und vergleicht die mittleren Bruchdehnungswerte der langsamen Versuche mit denen der schnellen Versuche, so läßt sich trotz der erheblichen Streuung der Einzelwerte aufzeigen, daß durch eine schnelle Zugbeanspruchung eine Zunahme der Bruchdehnung verursacht wird. Vergleichbare Ergebnisse wurden von Körmeling [13] veröffentlicht.

Die Vergrößerung der Bruchdehnung mit steigender Dehngeschwindigkeit ist bei den Zugversuchen ausgeprägter als bei den Druckversuchen. Inwieweit Faserart und Fasergehalt den Dehnungswert bei der Reißlast beeinflussen, kann wegen der großen Streubreite der Einzelergebnisse keine quantitative Aussage gemacht werden.

#### 4.3.3 Arbeitslinien, E-Modul, Querdehnung

In den Anlagen 4.5 bis 4.10 sind die Spannungs-Dehnungslinien sämtlicher Einzelversuche abgebildet. Man erkennt, daß sowohl für die langsamen als auch für die schnellen Versuche die Spannungs-Dehnungs-Beziehung - insbesondere bei Annäherung an die Bruchlast - nicht linear ist. Eine derartige Nichtlinearität für

beide Beanspruchungsarten (schnell und langsam) hat auch Zielinski [14] beobachtet. Für die Serie C I (glatte Fasern) sind in den Anlagen 4.11 und 4.12 für die drei untersuchten Fasergehalte beispielsweise je eine  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie bei schneller und bei langsamer Belastung einander gegenübergestellt.

Bei der Analyse der gemessenen Elastizitätsmoduli (Sekantenmodul zwischen 0,2  $F_u$  und 0,7  $F_u$ ) wurde wieder sehr deutlich, daß offenbar das Zugdehnverhalten von Beton außerordentlich großen Streuungen unterliegt. Die Bandbreite, innerhalb derer sich die E-Moduli für eine Versuchsreihe bewegten, betrug etwa  $\pm 30 \%$  vom Mittelwert. Differenzen vergleichbarer Größe sind auch der Veröffentlichung von Zielinski [14] zu entnehmen. Zusammenfassend betrachtet, ergibt sich bei einer schnellen Belastung eine geringfügige Steigerung des E-Moduls für den betrachteten Beanspruchungsbereich.

Die an einigen Probekörpern gemessenen Querdehnungen waren dem Betrag nach sehr klein und streuten zudem stark.

#### 4.4.4 Tragverhalten von Faserbeton im gerissenen Zustand

Mit der im Abschnitt 4.2 beschriebenen Meßvorrichtung sollte die Abhängigkeit der Tragfähigkeit gerissener Stahlfaserbetone von der Rißöffnung aufgezeigt werden. Die in den Anlagen 4.13 bis 4.16 abgebildeten Kurven verdeutlichen den Abfall der Betonspannung (besser wäre die Bezeichnung: auf die Rißfläche bezogene Auszugskraft der Stahlfasern) mit anwachsender Längung des Probekörpers, die der Rißbreite gleichzusetzen ist.

Die Ergebnisse zeigen, daß i.d.R. trotz der sehr steifen Ankopplung des Prüflings an die Belastungseinheit nach Erreichen der Rißlast die Probe nahezu schlagartig bis auf eine Rißbreite von

$\approx 0,4$  mm auseinandergezogen wurde. Zusätzliche Schwierigkeiten ergaben sich dadurch, daß bei der schnellen Belastung Probe und Meßsystem nach dem Reißen in Schwingung gerieten. Eine Möglichkeit, den Steifigkeitsabfall zu verringern, besteht prinzipiell darin, gleichzeitig mit der Betonprobe sogen. Lastnebenstäbe aus Stahl zu belasten, Shah et al [7]. Für dynamische Zugversuche erscheint diese Versuchsanordnung, nicht zuletzt wegen der vielen Anschlüsse und der hochgradigen statischen Unbestimmtheit, wenig geeignet.



## Literatur

- [1] Forschungsbericht T 549: Forschungsvorhaben Faserbeton.  
Hrg: Informationszentrum Raum und Bau der Fraunhofer  
Gesellschaft
- [2] Suaris, W., Shah, S.P.: Mechanical properties of materials  
subjected to impact. Rilem Symp. on Concrete Structures  
under Impact and Impulsive Loading, Introductory Report,  
Berlin, June 1982
- [3] Watstein, D.: Effect of straining rate on the compres-  
sive strength and elastic properties of concrete. ACI  
Journal, Vol. 49, No. 8, S. 729 - 744, April 1953
- [4] Takeda, J., Tachikawa, H.: Deformation and fracture of  
concrete subjected to dynamic load. Proc. of the Int. Conf.  
on Mechanical Behavior of Materials, Vol. 4, Concrete and  
Cement Paste, Glass and Ceramics, Kyoto, August 1971,  
S. 267 - 277
- [5] Cowell, W.: Dynamic properties of plain portland cement  
concrete. Techn. Report No. R. 447, U.S. Naval Engineer-  
ing Laboratory, Port Hueneme, California, Juni 1966
- [6] König, G., Dargel, H.J.: A constitutive law for reinforced  
concrete with considerations to the effect of high strain  
rates. Proc. of the Rilem Symp. on Concrete Structures un-  
der Impact and Impulsive Loading, S. 67 - 82, Berlin, June  
1982
- [7] Shah, S.P., Stroeven, P., Dahlhaisen, D., van Steckelen-  
burg, P.: Complete stress-strain curves for steel fibre  
reinforced concrete under uniaxial tension and compres-  
sion. Rilem Symp. on Testing and Test Methods of Fibre  
Cement Composites, S. 399 - 408, Sheffield, April 1979
- [8] Mihashi, H., Wittmann, F.H.: Stockastic approach to study  
the influence of rate of loading on strength of concrete.  
Heron, Vol. 25, No. 3, 1980, Delft Univ. of Technology,  
The Netherlands
- [9] Paulmann, K., Steinert, J.: Verhalten von Beton bei sehr  
kurzer Belastungsgeschichte. Bericht des Inst. für Bau-  
stoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität  
Braunschweig, 1980

- 10 Paulmann, K., Steinert, J.: Verhalten der Biegedruckzone nach schneller, hoher und kurzzeitiger Belastung. Bericht des Inst. für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, 1983
- 11 Rostásy, F.S., Hartwich, K.: Rißverhalten von faserbewehrtem Beton mit zusätzlicher schlaffer Bewehrung. Bericht des Inst. für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Technische Universität Braunschweig, August 1982
- 12 Körmeling, H.A., Zielinski, A.J., Reinhardt, H.W.: Experiments on concrete under single and repeated uniaxial impact loading. Report 5-80-3, Stevin Laboratory, Delft University of Technology, The Netherlands
- 13 Körmeling, H.A.: A model for concrete under impact tensile loading. Proc. of the Rilem Symp. on Concrete Structures under Impact and Impulsive Loading, S. 125 - 133, Berlin, June 1982
- 14 Zielinski, A.J.: Beton unter schlagartiger Zugbeanspruchung. Beiträge zum 13. Forschungskolloquium des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Delft, April 1982

# ANHANG

Betonzusammensetzung je m<sup>3</sup> Frischbeton

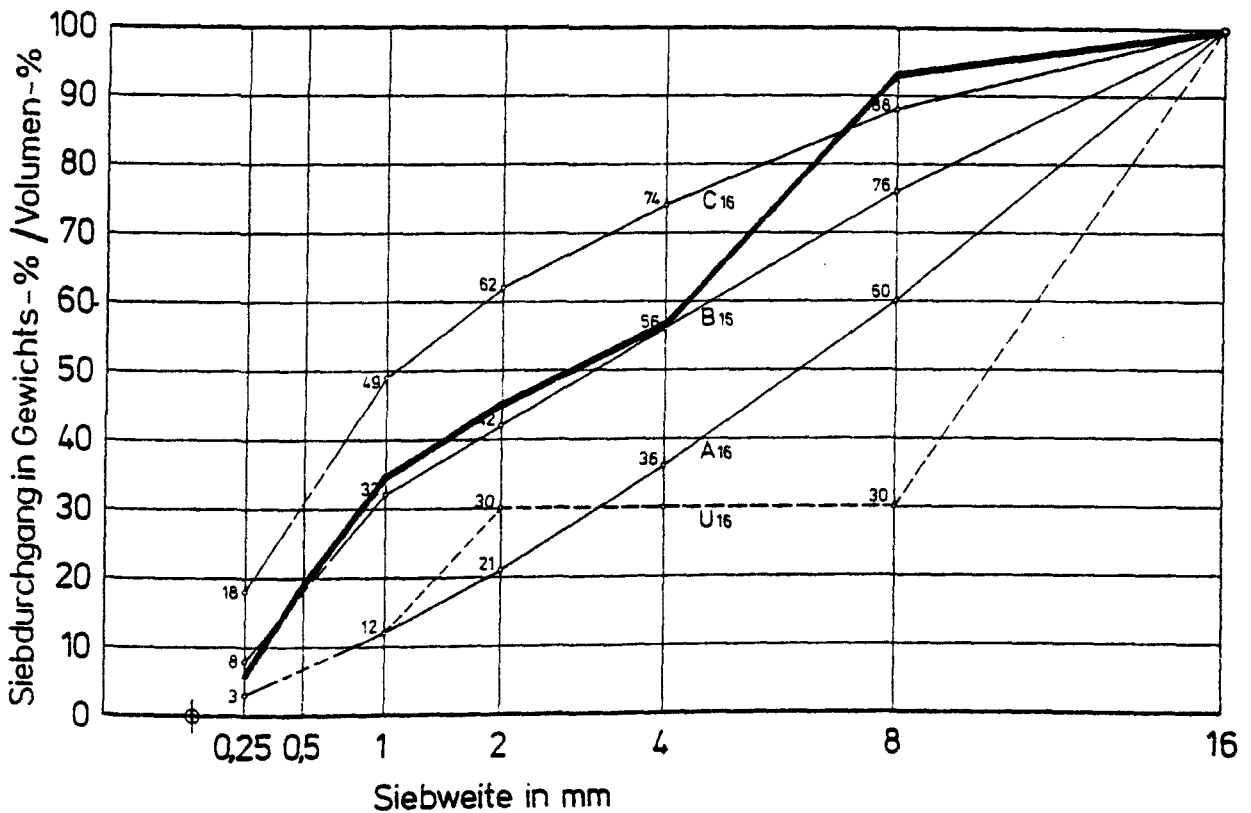
Zement:	PZ 35 F	240,0 kg
Wasser:		218,8 kg
Zuschlag:	0/1 : 10 %	1.717,6 kg
	0/2 : 40 %	
	2/8 : 40 %	
	8/16 : 10 %	

Gesteinsmehl:	Kalkstein	72,5 kg
Stahlfasern:	glatte Fasern: Wirex 0,4/25	
	Hakenfaser: Dramix ZP 30/.50	
	$\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$	9,4 kg
	$\mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}$	4,7 kg

Betonverflüssiger: Wörmann BV

Zugabemenge nach Augenschein, bis fließfähiger Beton erreicht wurde

0/16 mm



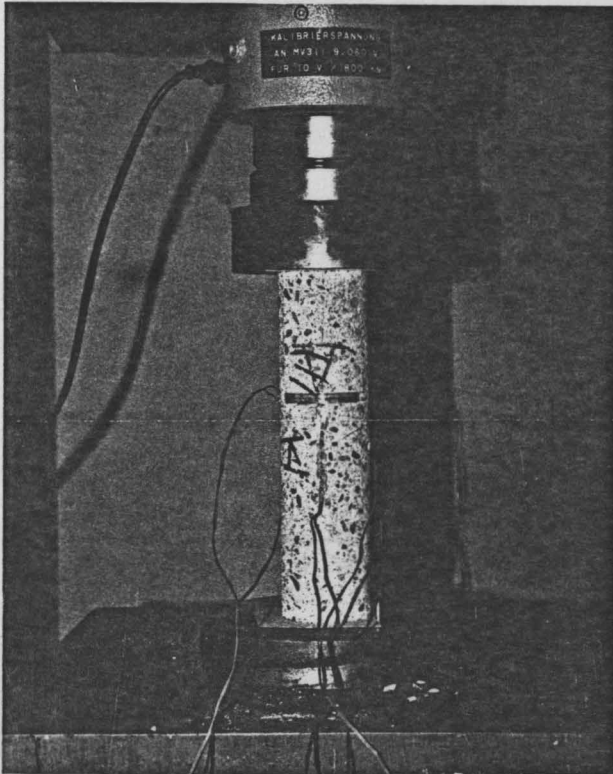


Bild 1:

Probe vor der Belastung; man erkennt: Anordnung der DMS, Kraftmeßdose, Kugelkalotte, Lastplatte und Pappzwischenlagen

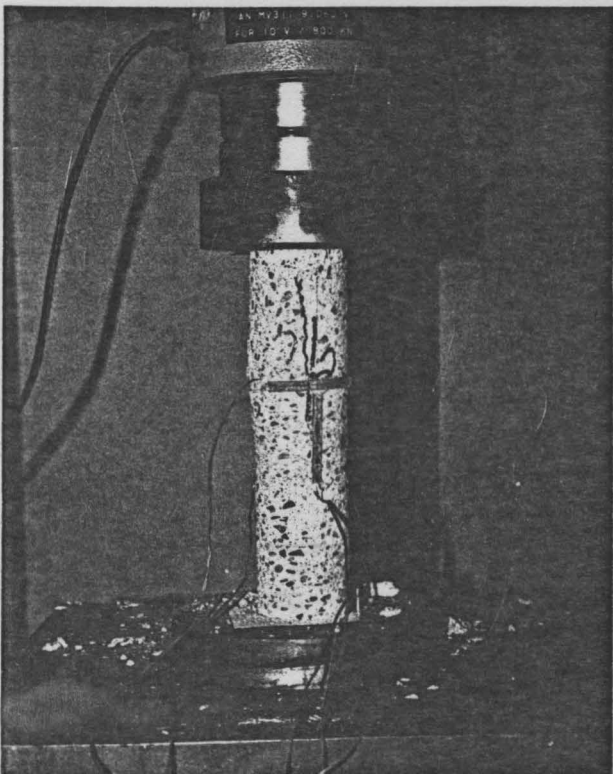
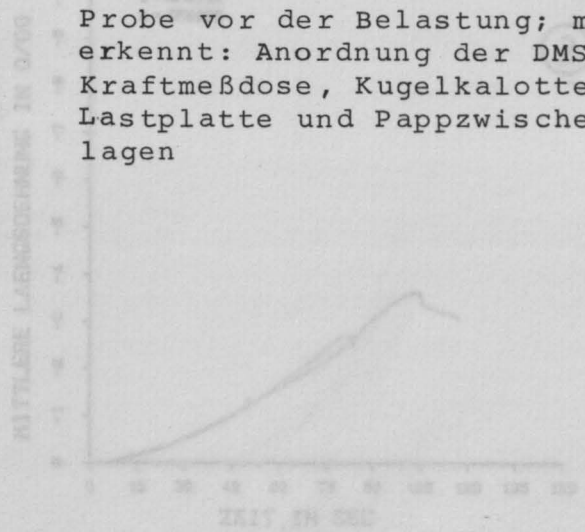
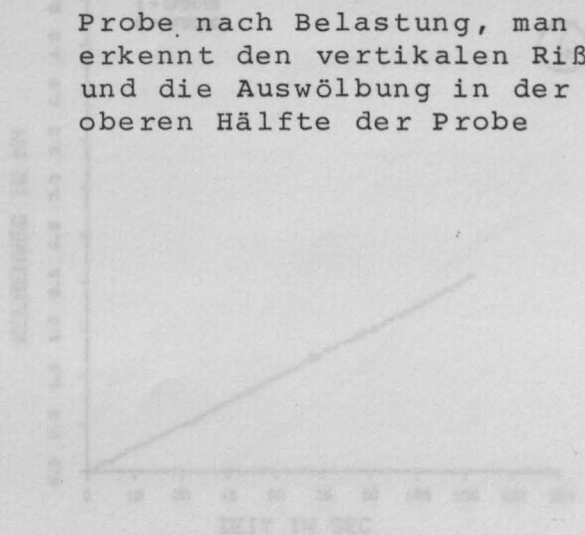
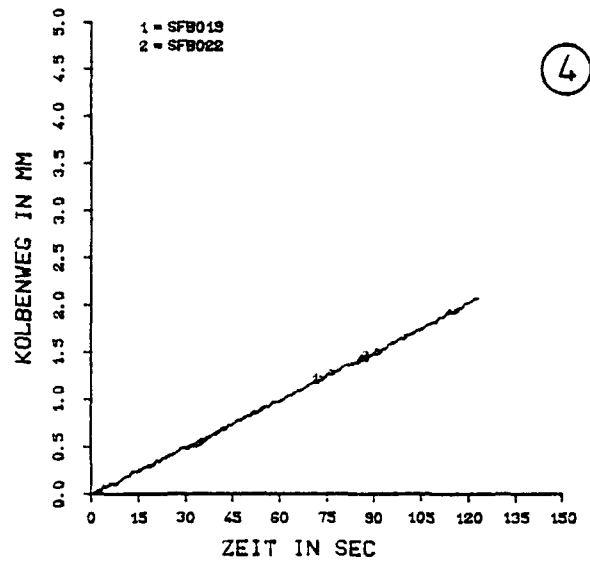
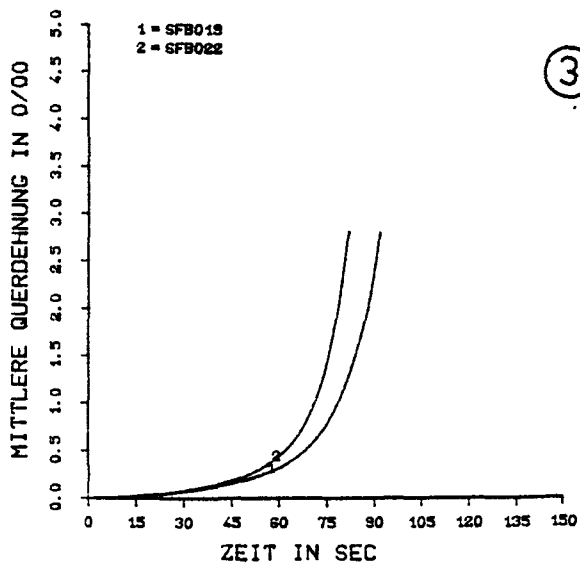
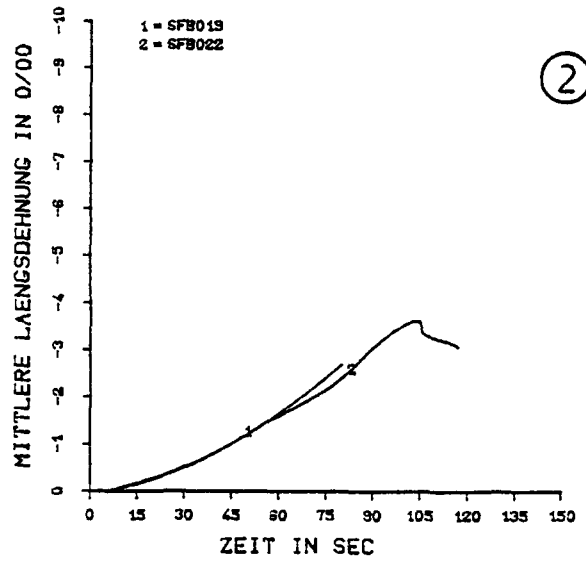
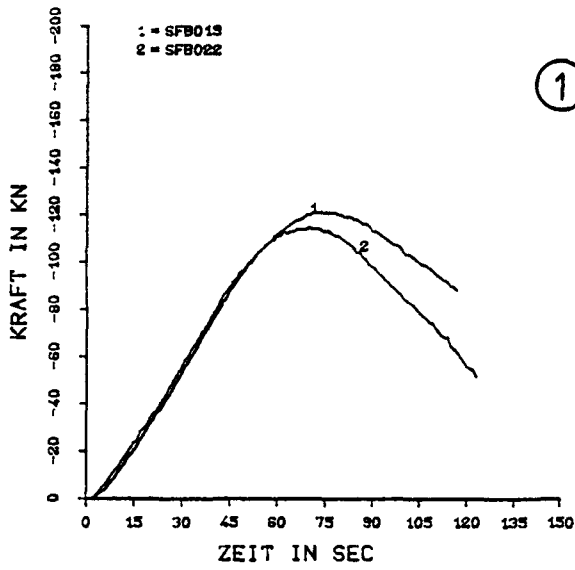


Bild 2:

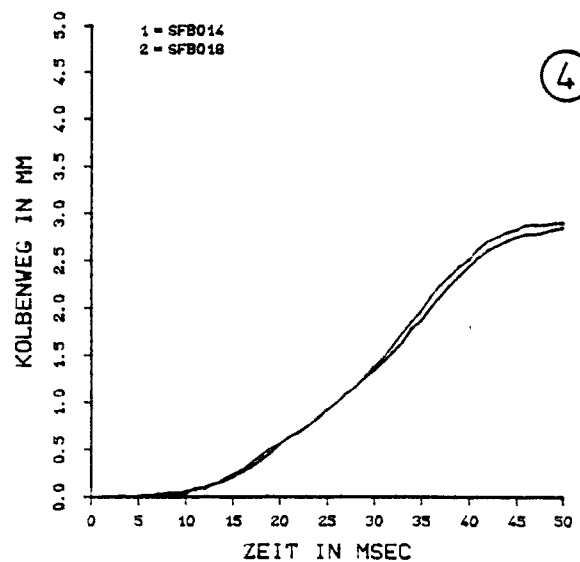
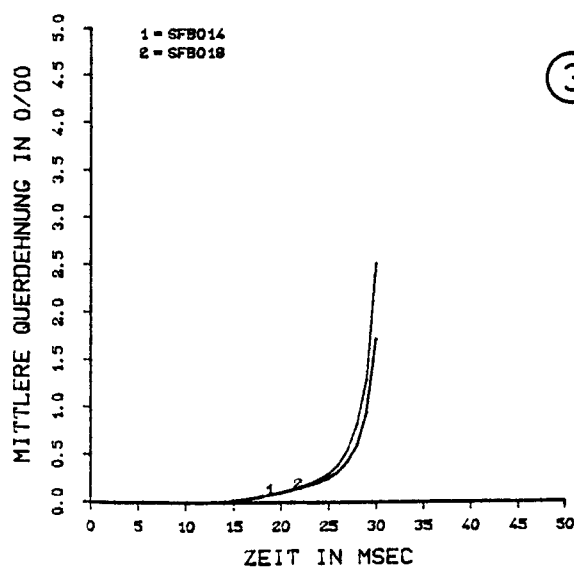
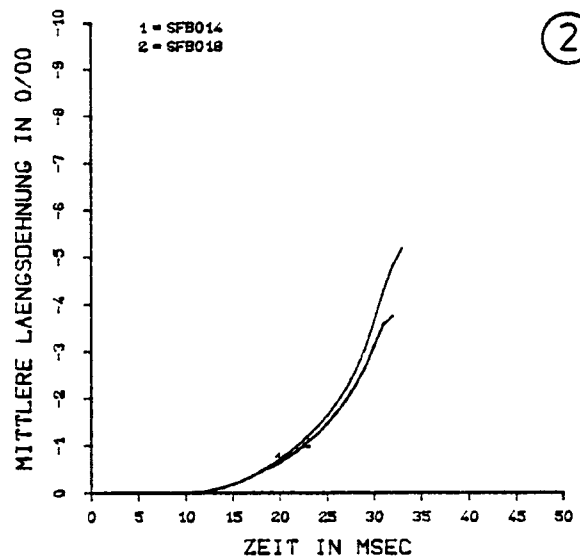
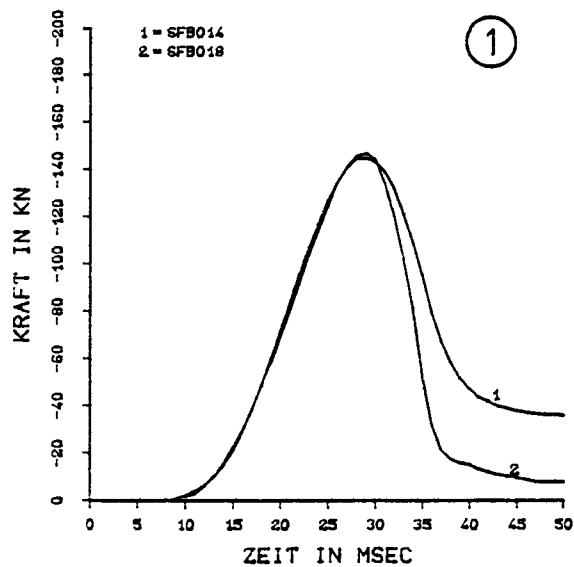
Probe nach Belastung, man erkennt den vertikalen Riß und die Auswölbung in der oberen Hälfte der Probe



Faserbetonproben vor und nach der zentrischen Druckbelastung



Meßgrößen der langsamen zentrischen Druckversuche in Abhängigkeit von der Zeit



Meßgrößen der schnellen zentrischen Druckversuche in Abhängigkeit von der Zeit

		Zentrische Druckfestigkeit $\beta_c$ in N/mm <sup>2</sup>				Variations-Koeffizient v	
Belastungsart, Beanspruchungsrichtung		glatte Fasern		Hakenfasern			ohne Fasern
		$\mu_f = 1,50\%$	$\mu_f = 0,75\%$	$\mu_f = 1,50\%$	$\mu_f = 0,75\%$		
langsam	parallel	21,73	23,55	18,73	15,49	23,53	2,13 %
		21,39	24,23	18,84	15,09	23,39	
		21,95	24,01	20,42	15,45	23,89	
	normal	21,82	24,11	19,25	14,46	22,99	3,24 %
		22,46	23,06	20,58	13,66	21,58	
		23,66	22,17	./.	./.	21,96	
schnell	parallel	27,87	29,16	21,94	18,71	28,99	3,37 %
		27,07	29,38	./.	17,47	28,52	
		26,78	29,63	25,54	18,41	27,65	
	normal	27,21	27,55	23,63	18,76	28,29	3,29 %
		27,31	25,29	./.	./.	28,44	
		26,62	./.	24,34	19,74	27,27	

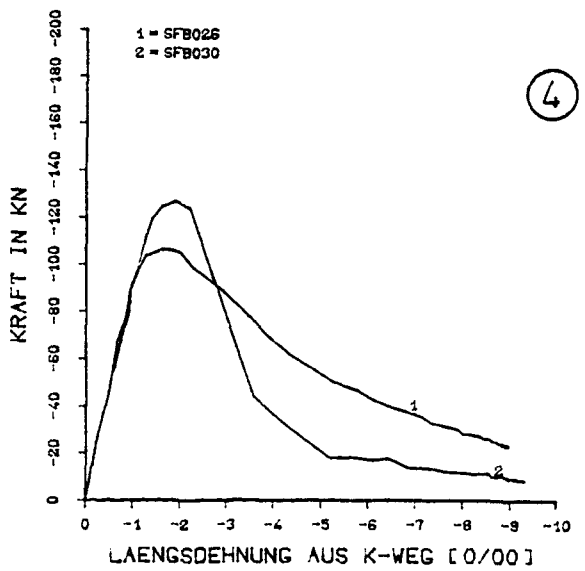
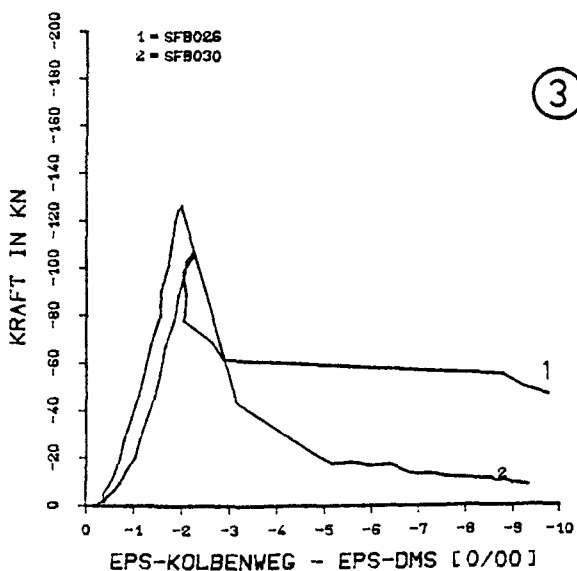
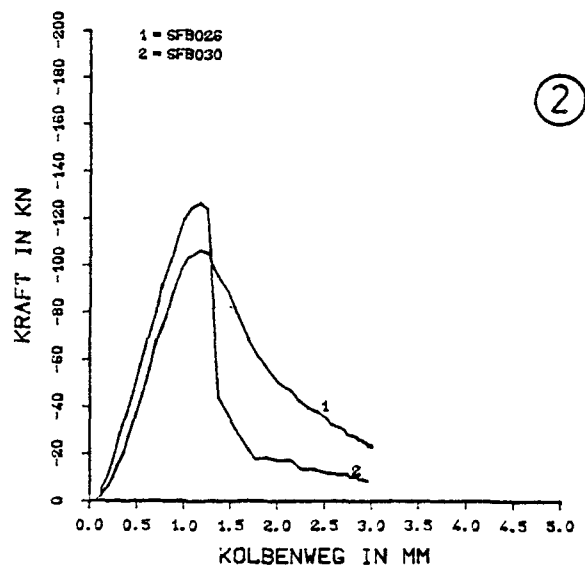
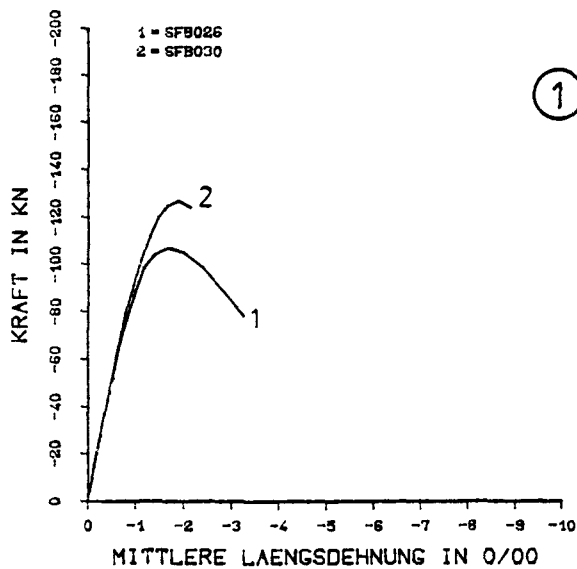
Zusammenstellung der Ergebnisse der zentrischen Druckversuche



Anlage 2.6

Belastungs- art	zentrische Druckfestigkeit $\beta_c$ in N/mm <sup>2</sup>				
	glatte Fasern		Hakenfasern		o. Fasern
	$\mu_f = 1,50 \%$	$\mu_f = 0,75 \%$	$\mu_f = 1,50 \%$	$\mu_f = 0,75 \%$	./.
langsam	22,17	23,52	19,57	14,83	22,89
	100 %				
schnell	27,15	28,20	23,87	18,62	28,20
	122,4 %	119,9 %	122,0 %	125,6 %	123,2 %
	121,2 %		123,8 %		123,2 %
	122,5 %				123,2 %

Vergleich der zentrischen Druckfestigkeitswerte für langsame und schnelle Beanspruchung

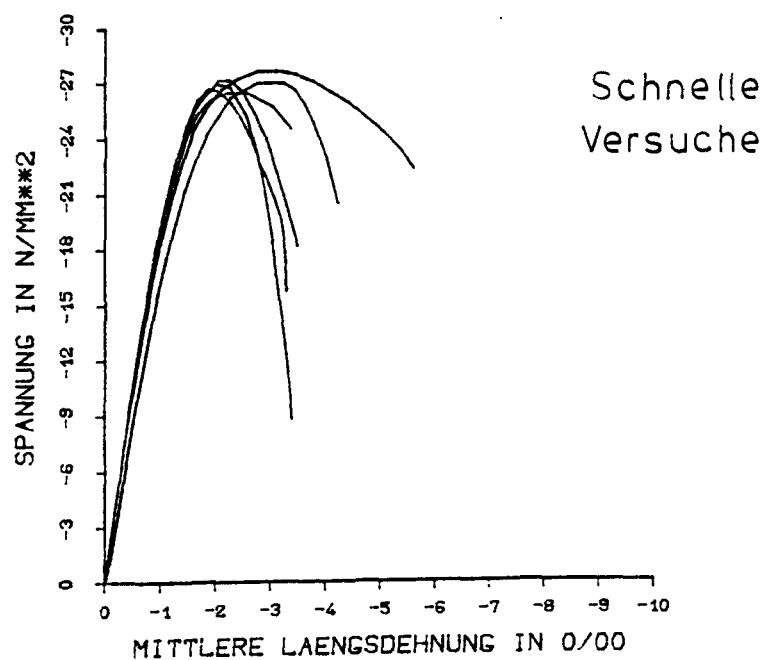
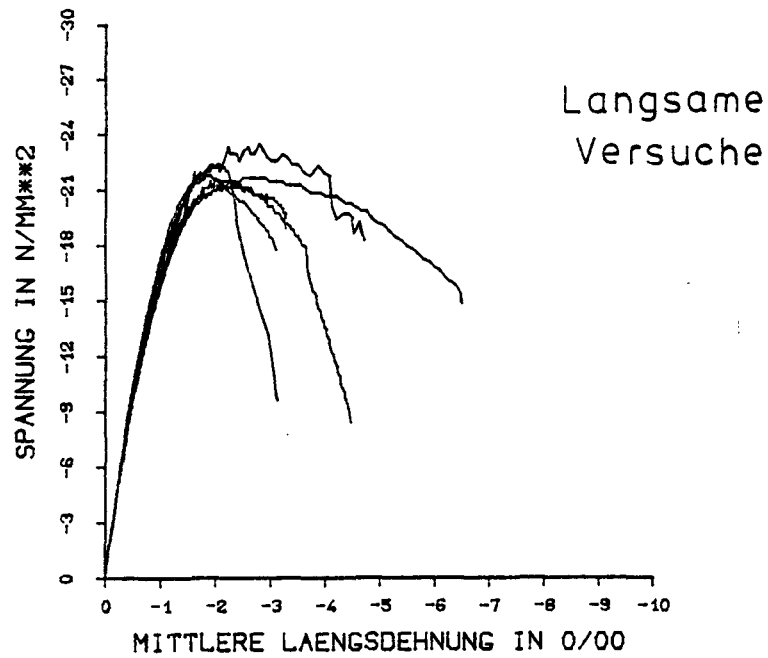


Meß- und Korrekturgrößen zur Ermittlung der Längsdehnung  
aus dem Kolbenweg

Faserart	Belastungs-	$\epsilon_u^{DMS}$ [%]	$\epsilon_u^{K-weg}$ [%]	$E_{Sek}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]	$E_{Ur}$ [kN/mm <sup>2</sup> ]
Fasergehalt	art	$\epsilon_u/\epsilon_{u,stat}$	$\epsilon_u/\epsilon_{u,stat}$	$E/E_{stat}$	$E/E_{stat}$
glatte Fasern $\mu_f = 1,50 \%$	langsam	2,07	2,02	15,6	22,1
	schnell	2,28 (110,1 %)	2,27 (112,4 %)	17,6 (112,6 %)	22,0 (99,4 %)
glatte Fasern $\mu_f = 0,75 \%$	langsam	2,11	1,98	16,0	23,2
	schnell	2,24 (106,2 %)	2,03 (102,5 %)	18,5 (115,3 %)	22,3 (96,0 %)
Hakenfasern $\mu_f = 1,50 \%$	langsam	1,89	1,81	14,9	21,4
	schnell	1,83 (96,8 %)	1,82 (100,6 %)	17,5 (117,2 %)	21,2 (99,1 %)
Hakenfasern $\mu_f = 0,75 \%$	langsam	1,71	1,54	11,8	15,0
	schnell	1,94 (113,5 %)	1,96 (127,3 %)	13,4 (113,8 %)	16,1 (107,0 %)
ohne Fasern	langsam	1,93	1,79	16,4	22,7
	schnell	2,24 (116,1 %)	1,87 (104,5 %)	18,3 (111,6 %)	22,4 (98,7 %)
DYN/STAT		1,085	1,095	1,141	1,000

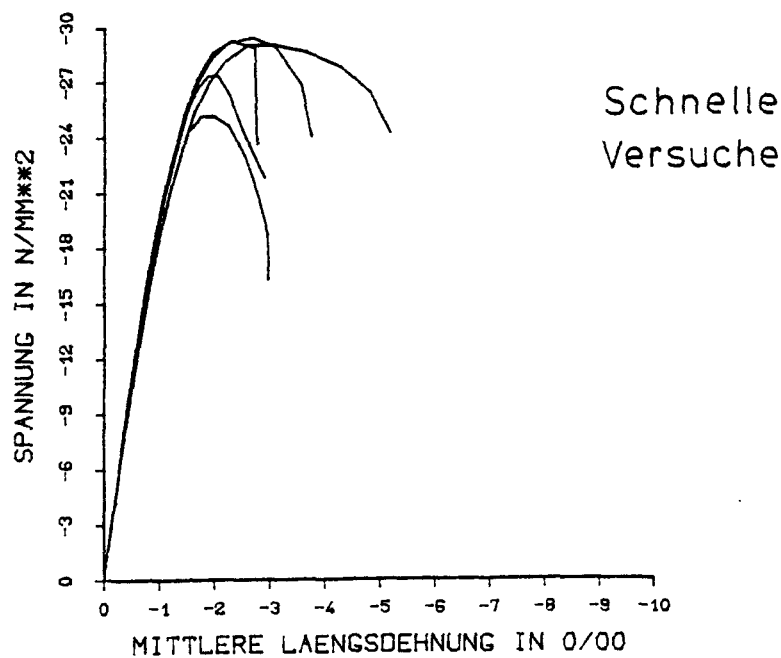
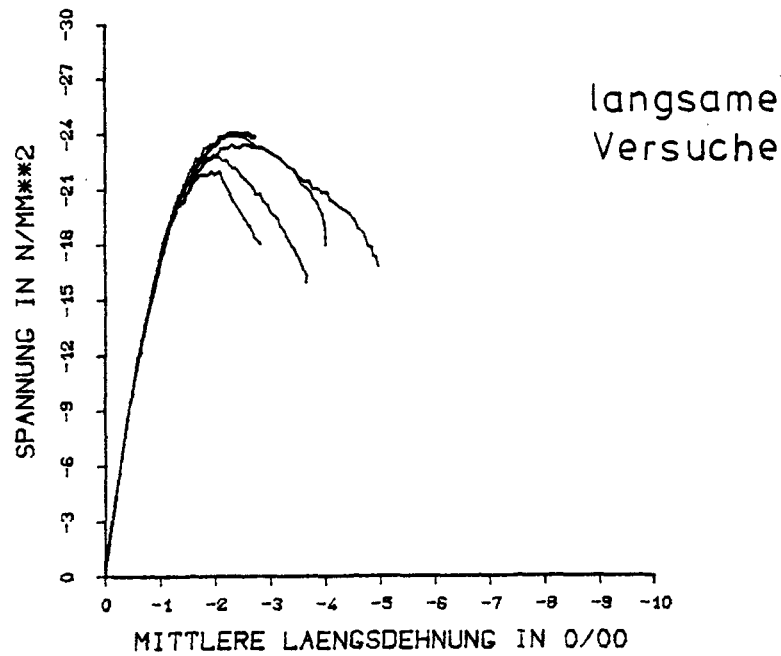
Bruchdehnungen und E-Moduli für langsame und schnelle Beanspruchung

Glatte Fasern

 $\mu_f = 1,50\%$ 

Spannungs-Dehnungslinien der Einzelversuche für  
langsame und schnelle Belastungen, Dehnwerte aus  
DMS-Messungen

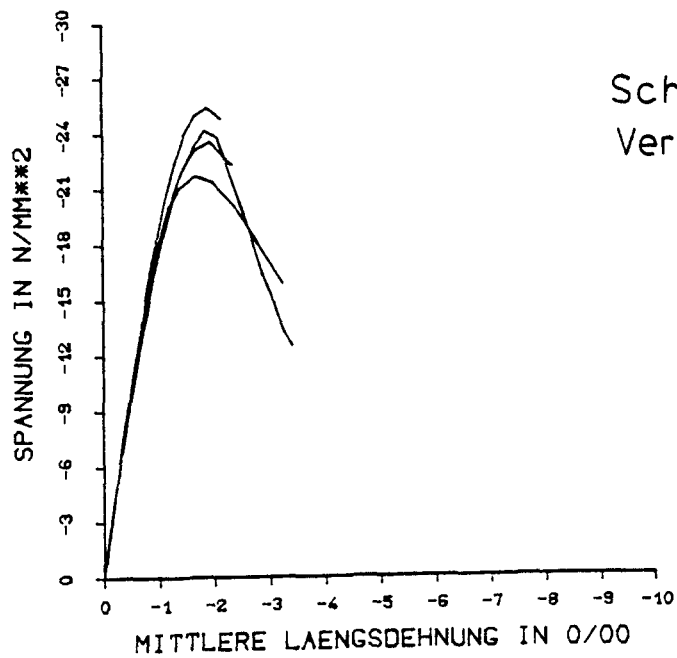
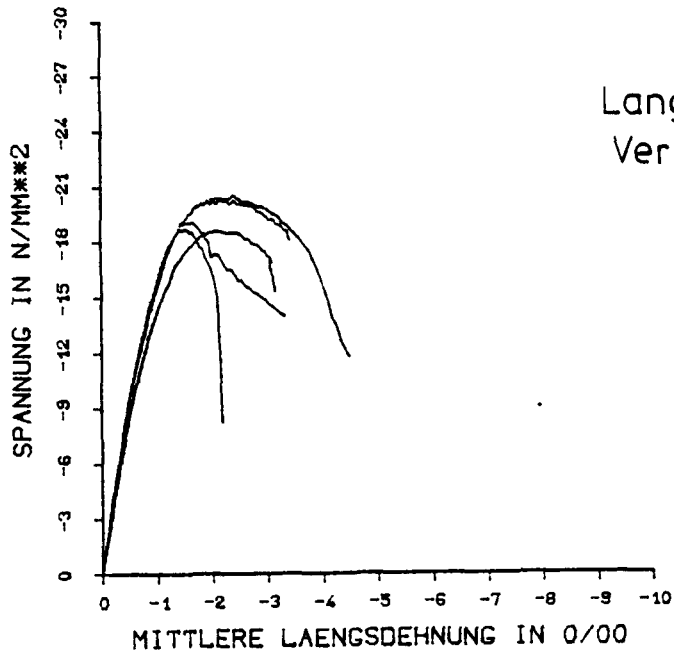
Glatte Fasern

 $\mu_f = 0,75\%$ 

Spannungs-Dehnungslinien der Einzelversuche für  
langsame und schnelle Belastungen, Dehnwerte aus  
DMS-Messungen

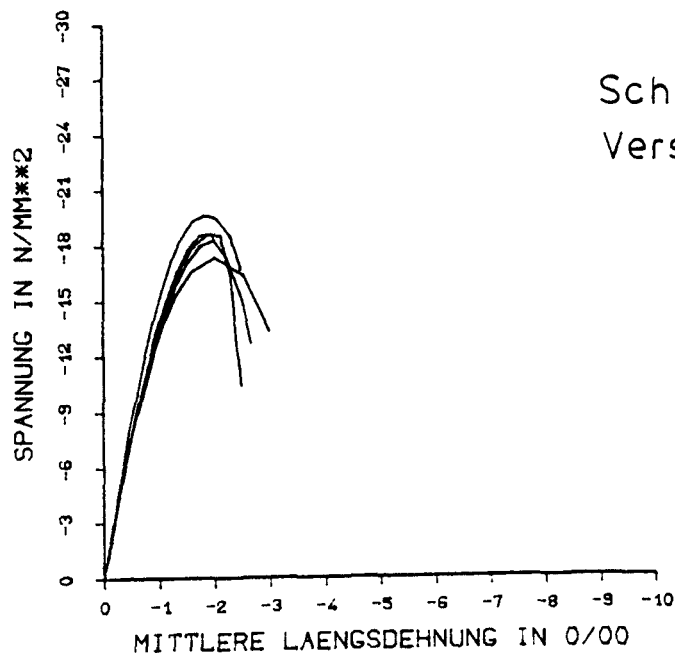
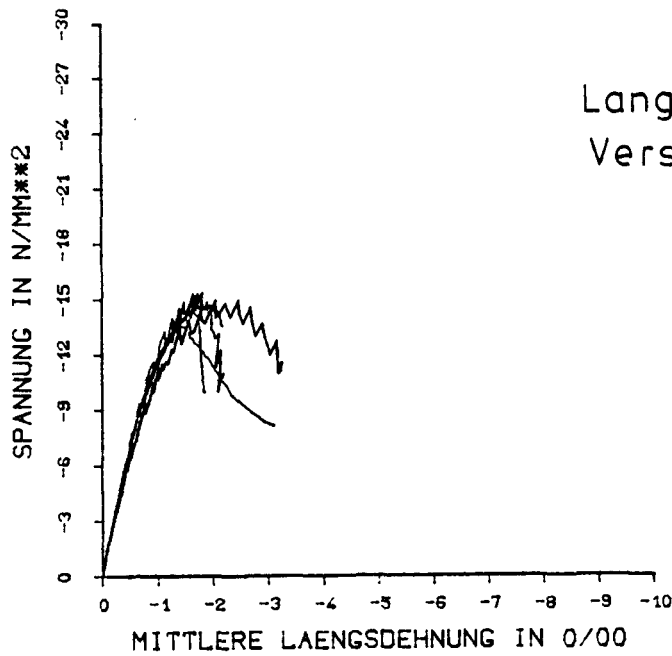
Hakenfasern

$\mu_f = 1,50 \%$



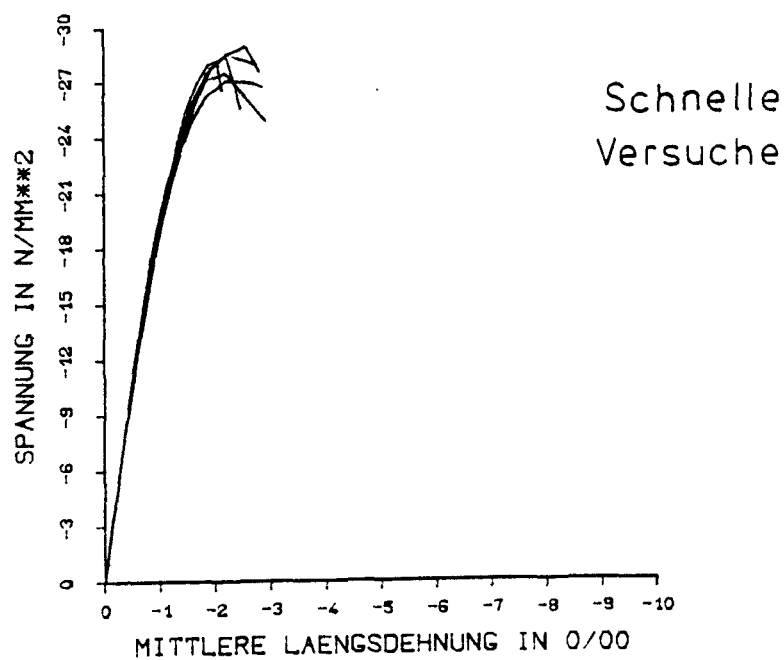
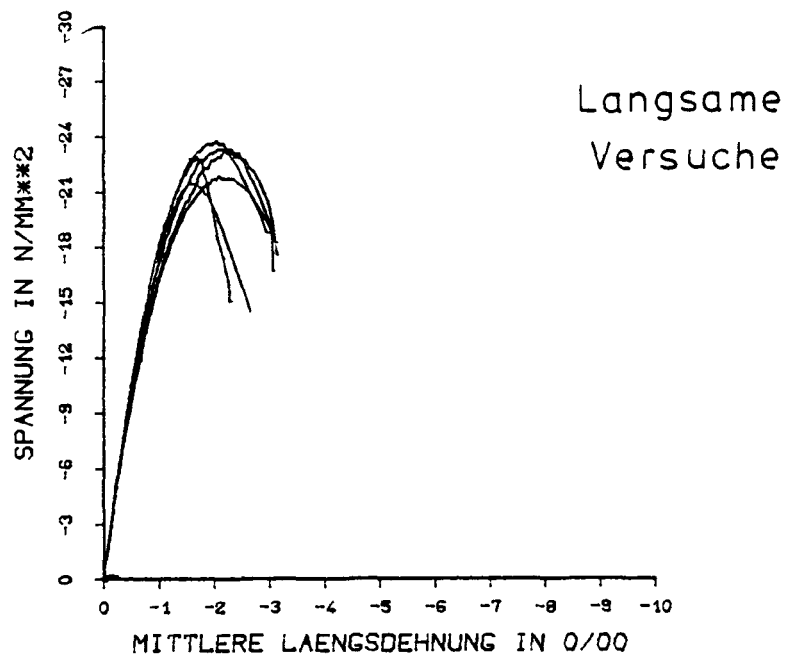
Spannungs-Dehnungslinien der Einzelversuche für  
langsame und schnelle Belastungen, Dehnwerte aus  
DMS-Messungen

Hakenfasern

 $\mu_f = 0,75 \%$ 

Spannungs-Dehnungslinien der Einzelversuche für  
langsame und schnelle Belastungen, Dehnwerte aus  
DMS-Messungen

## Ohne Fasern

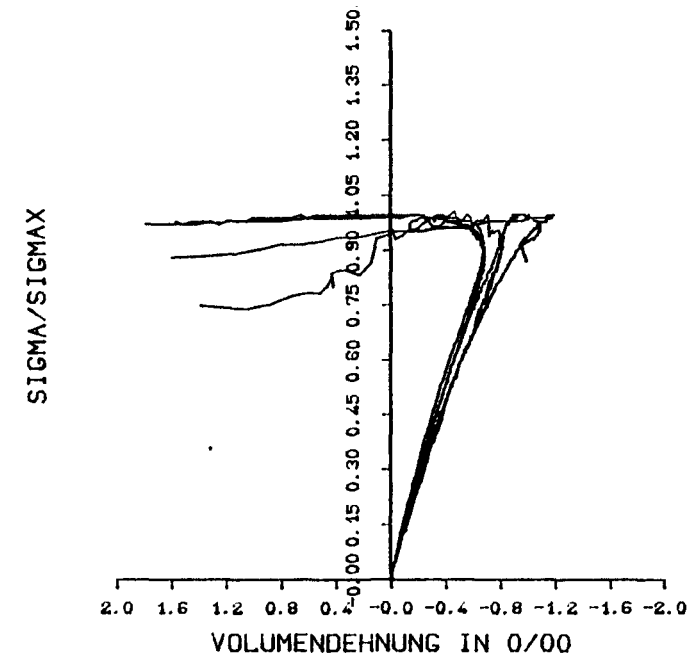
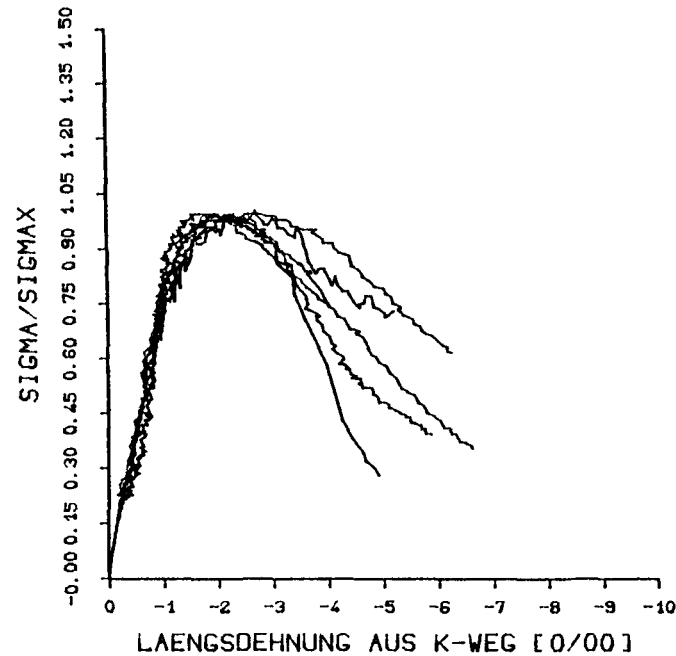


Spannungs-Dehnungslinien der Einzelversuche für  
langsame und schnelle Belastungen, Dehnwerte aus  
DMS-Messungen



Glatte Fasern  $\mu_f = 1,50\%$

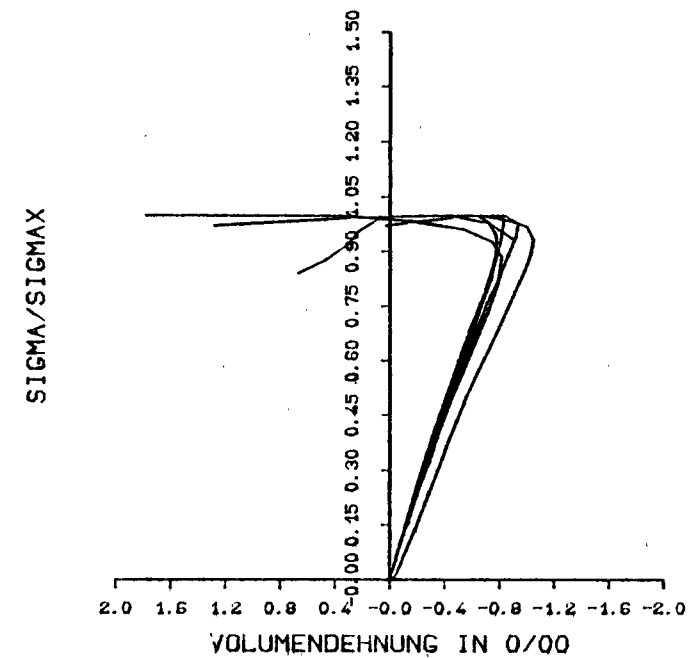
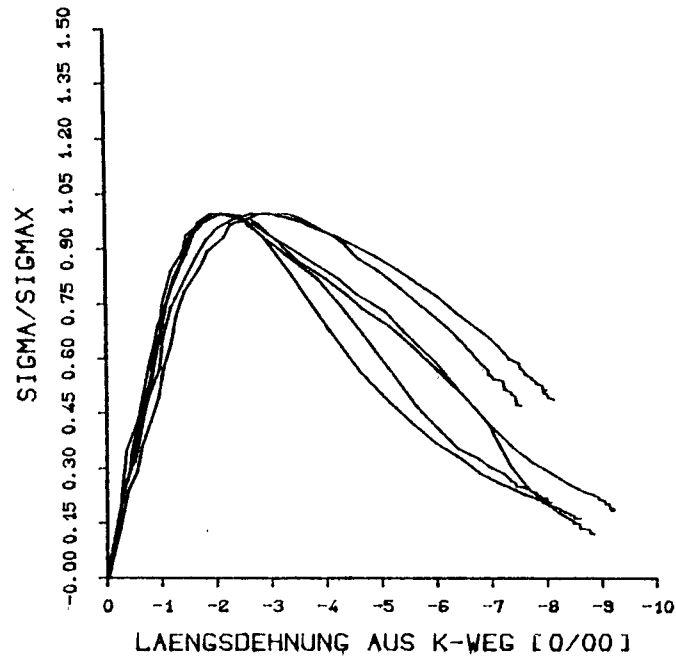
Langsame Versuche



Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$

Glatte Fasern  $\mu_f = 1,50\%$

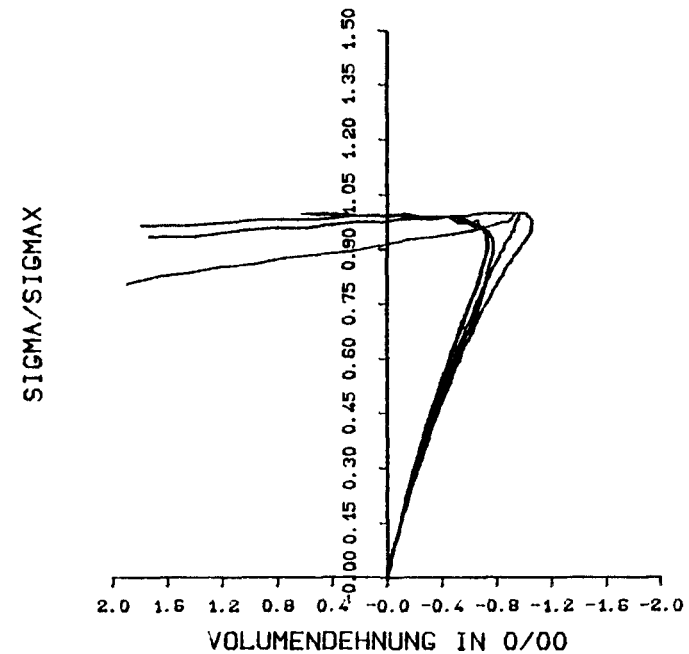
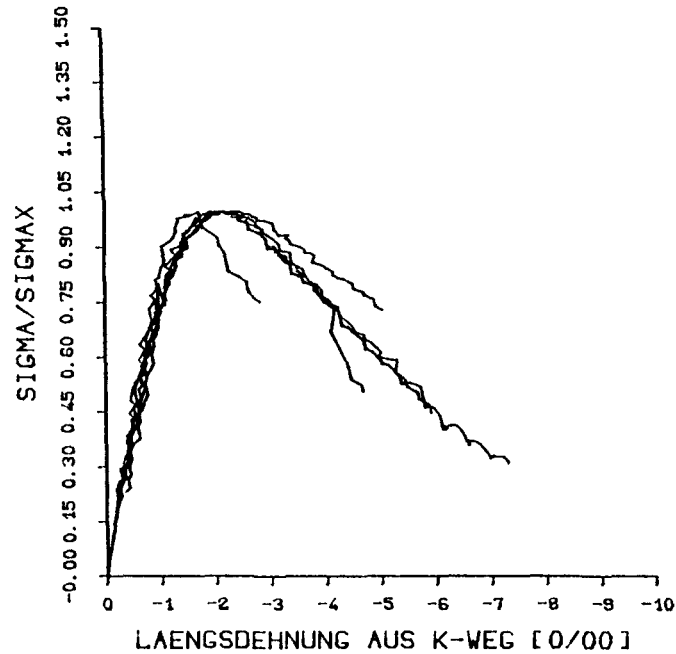
Schnelle Versuche



Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$

Glatte Fasern  $\mu_f = 0,75\%$

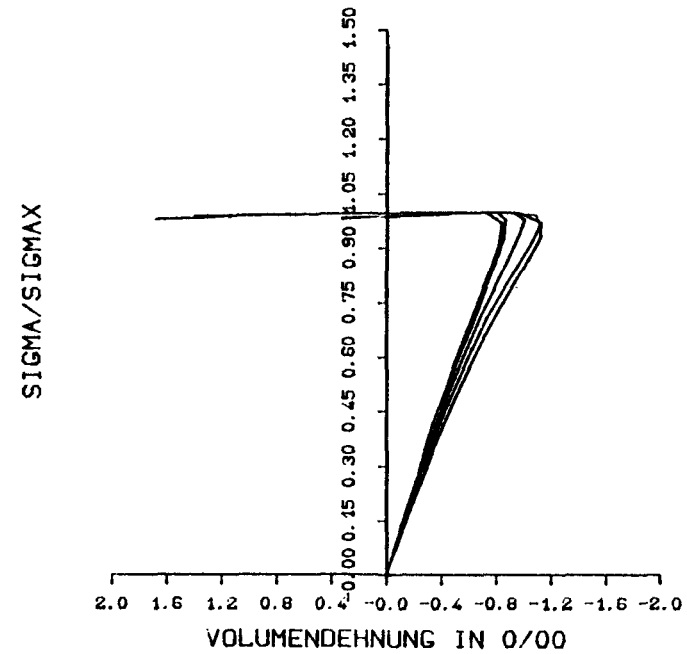
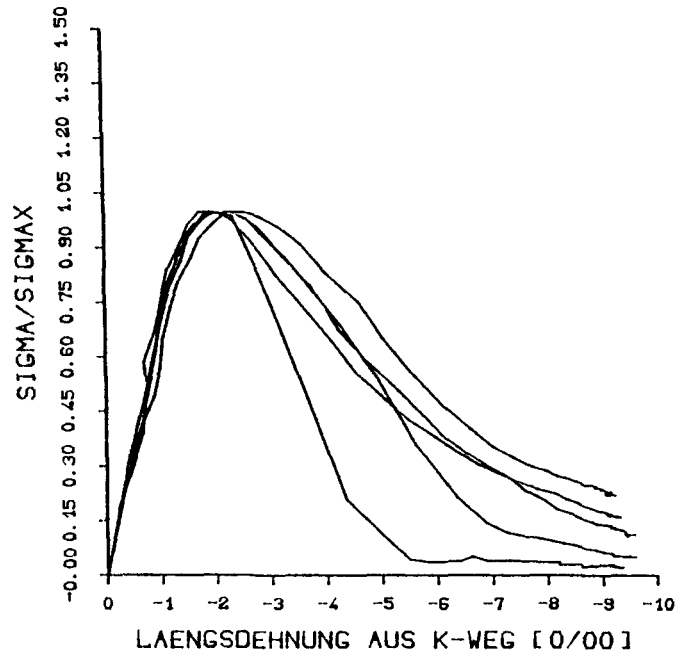
Langsame Versuche



Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$

Glatte Fasern  $\mu_f = 0,75\%$

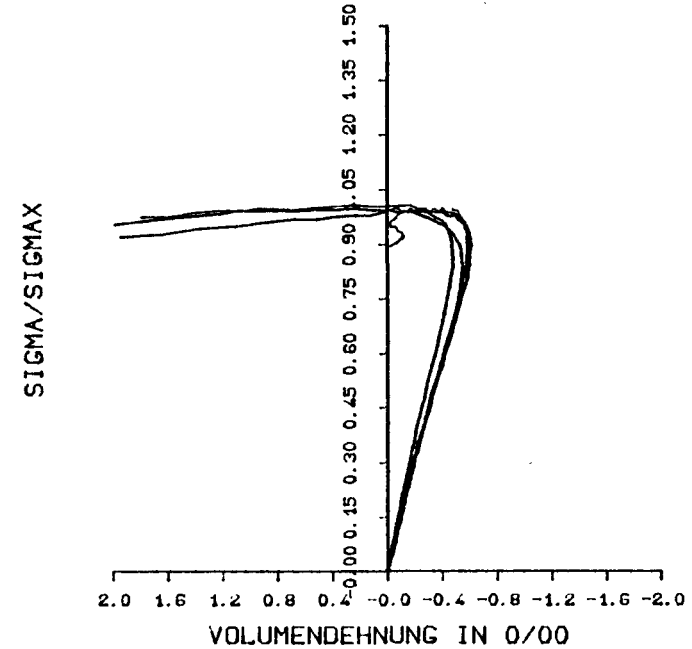
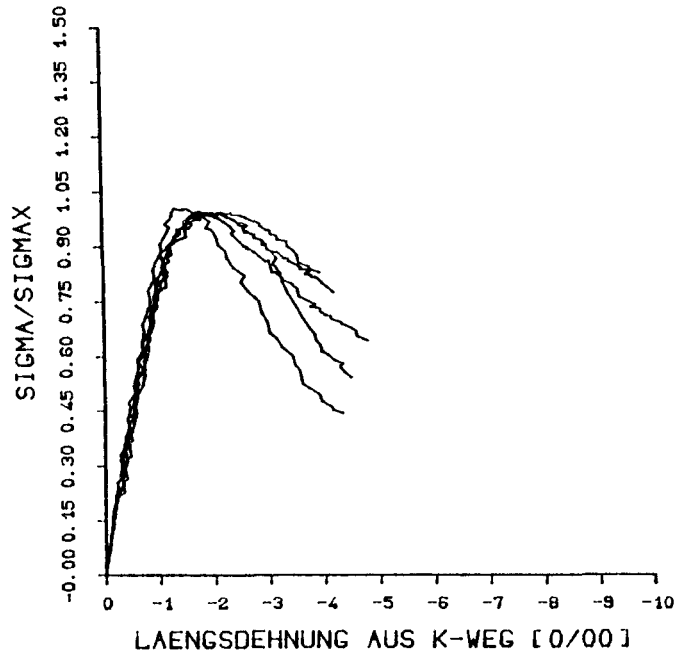
Schnelle Versuche



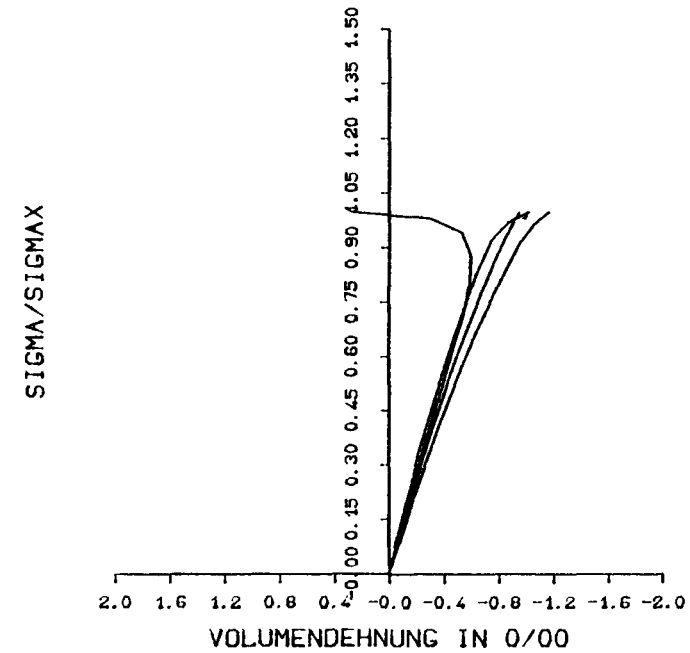
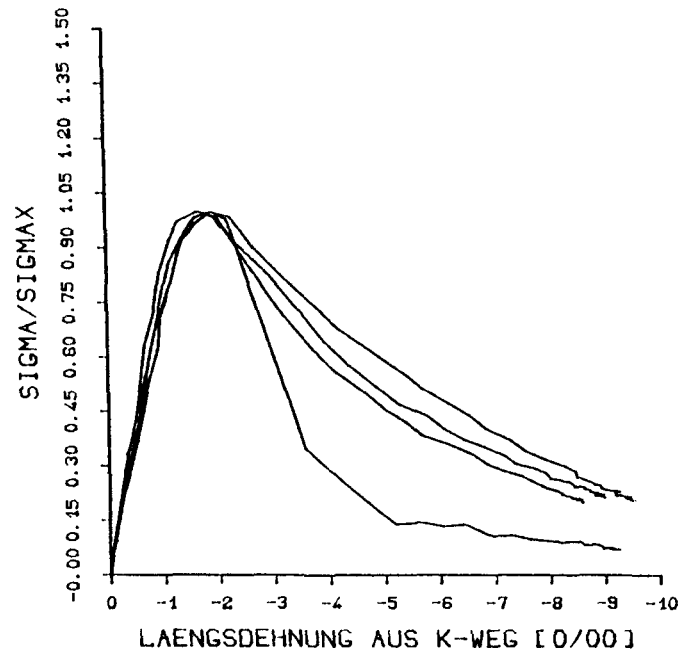
Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$

Langsame Versuche



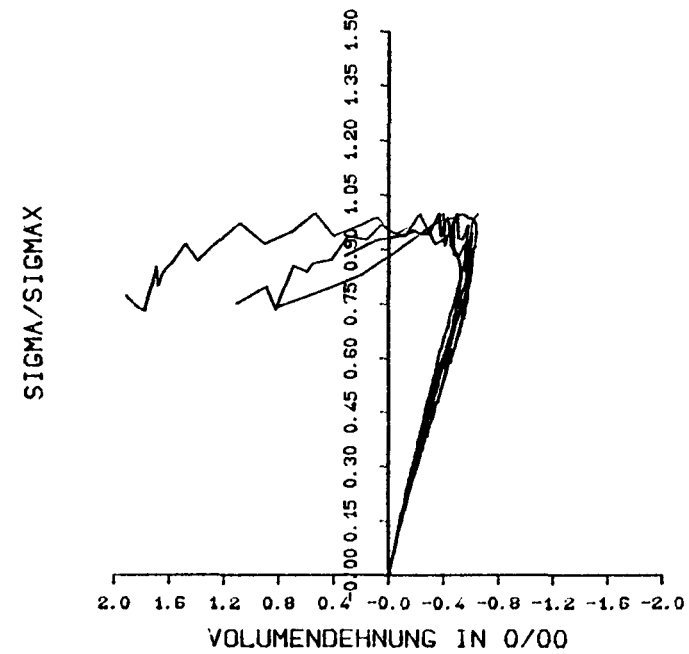
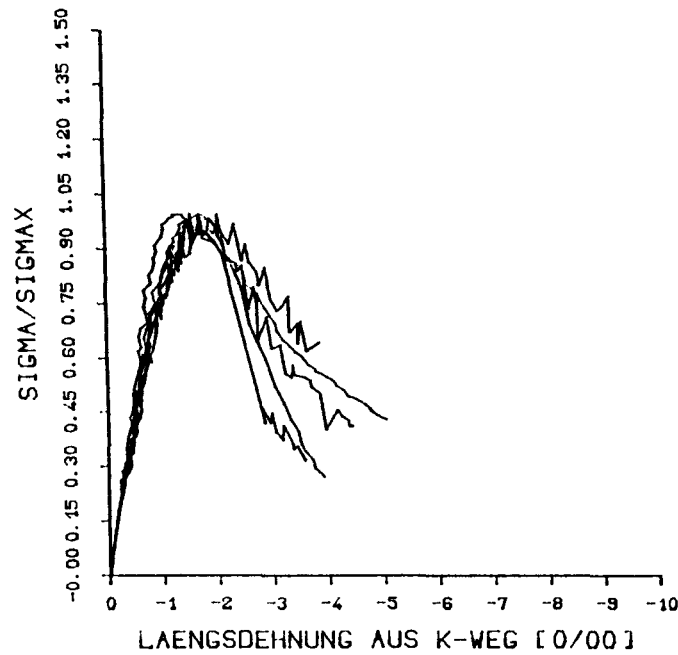
Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$



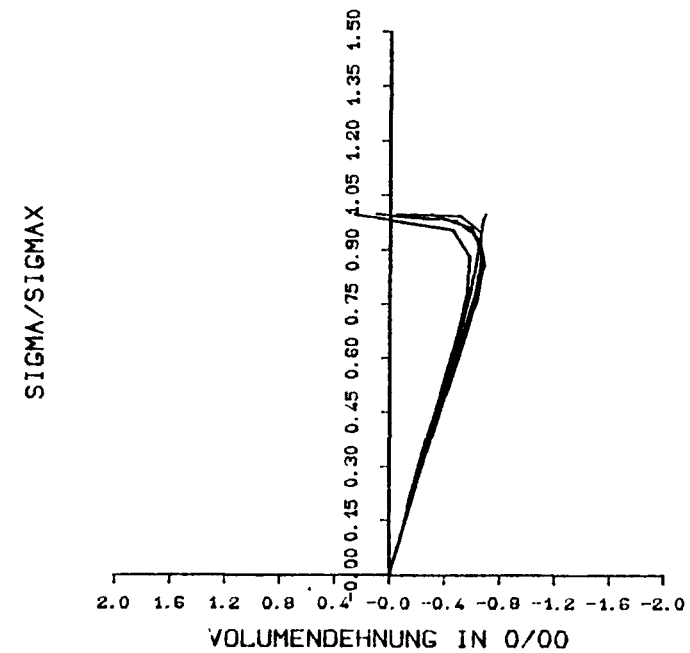
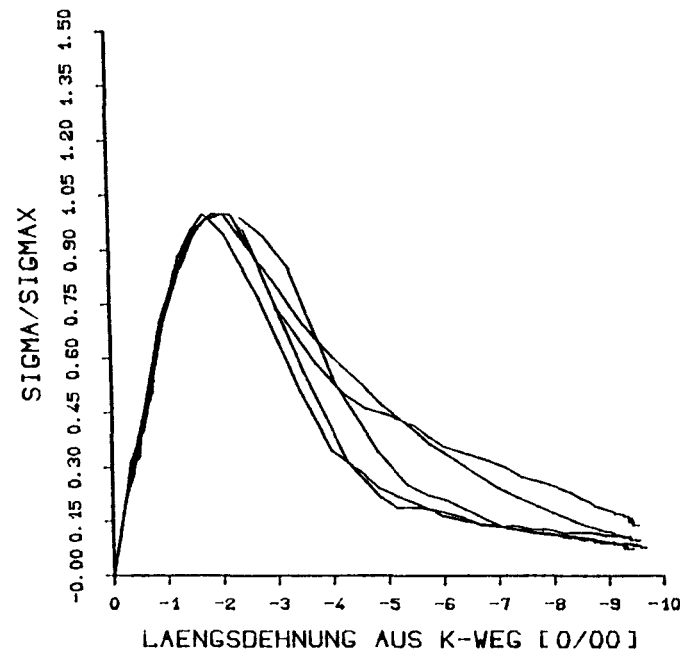
Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$

Langsame Versuche



Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$

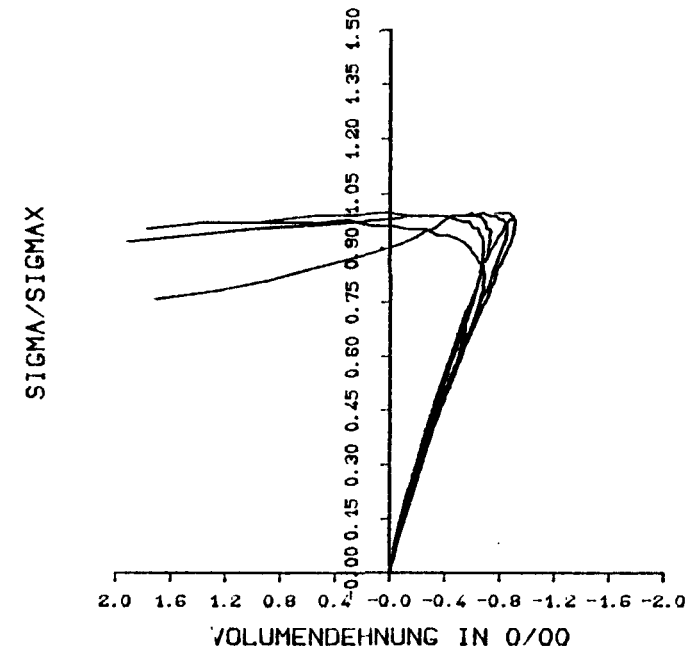
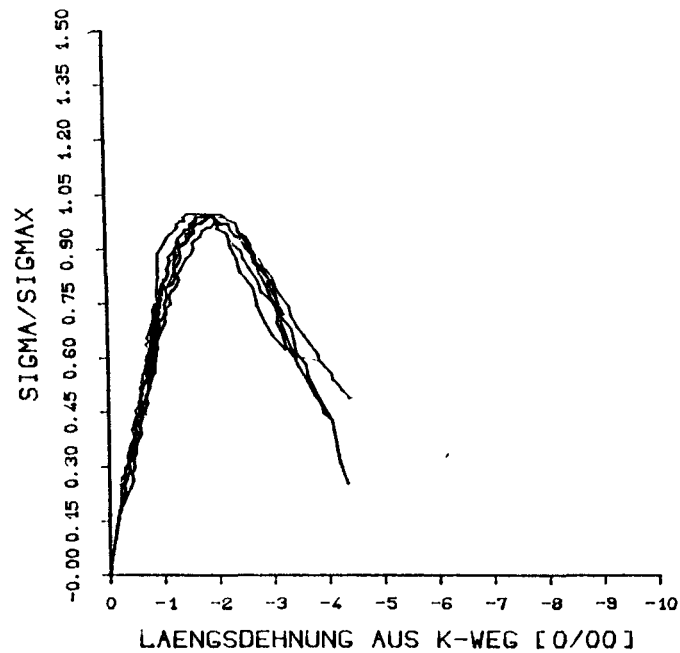


Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$



## Ohne Fasern

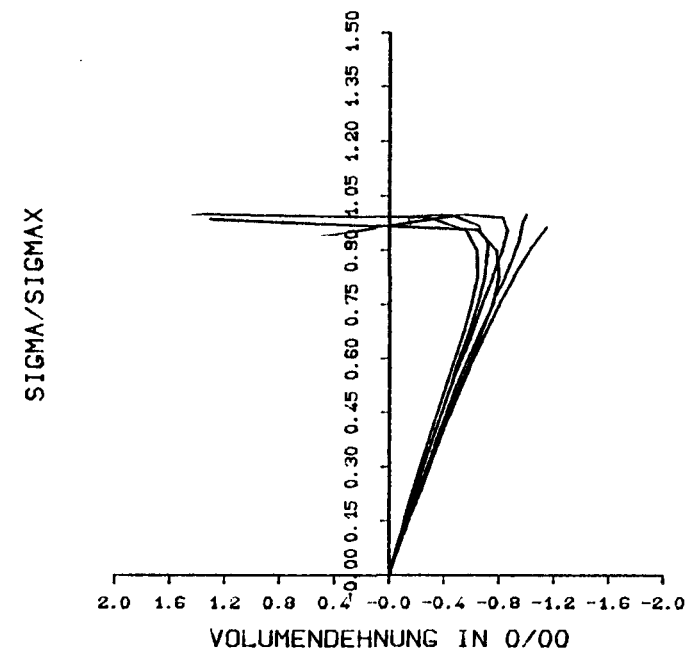
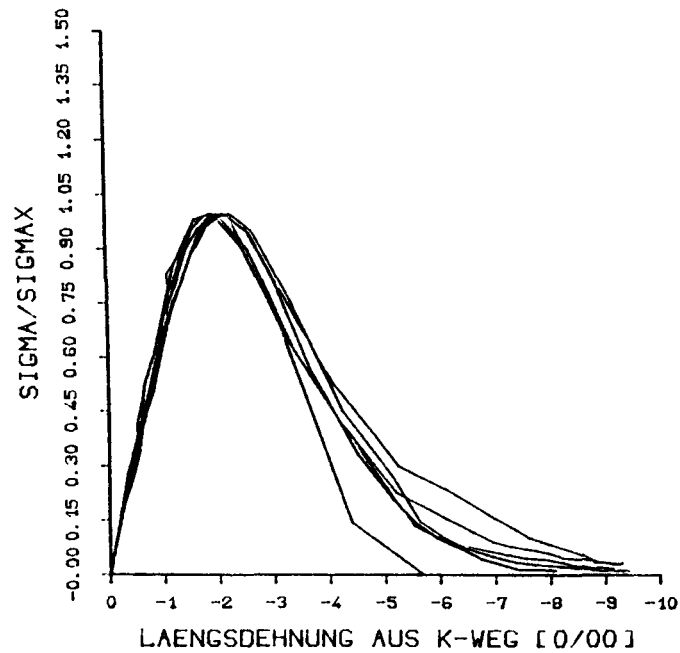
## Langsame Versuche



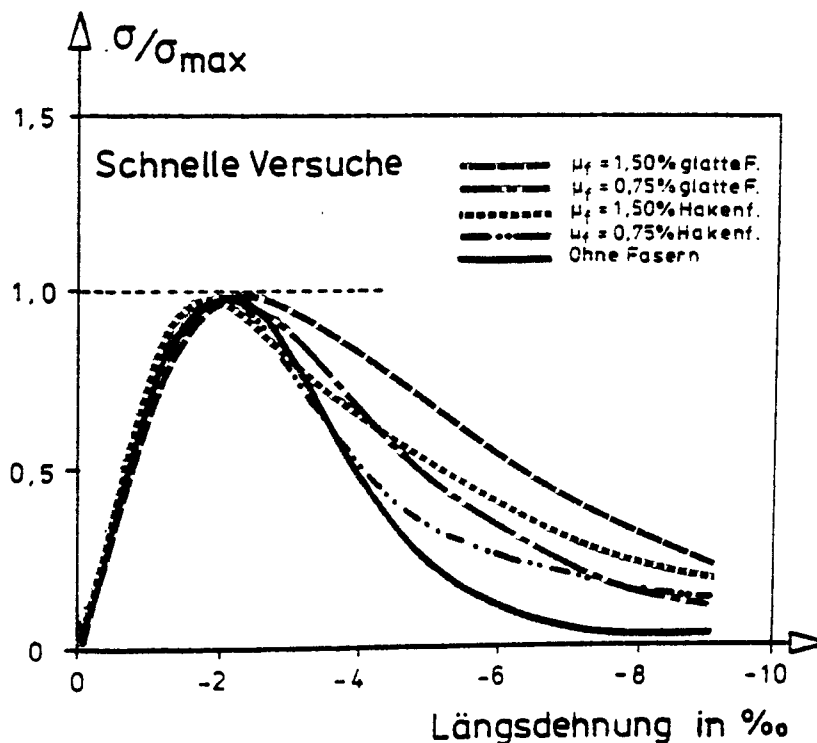
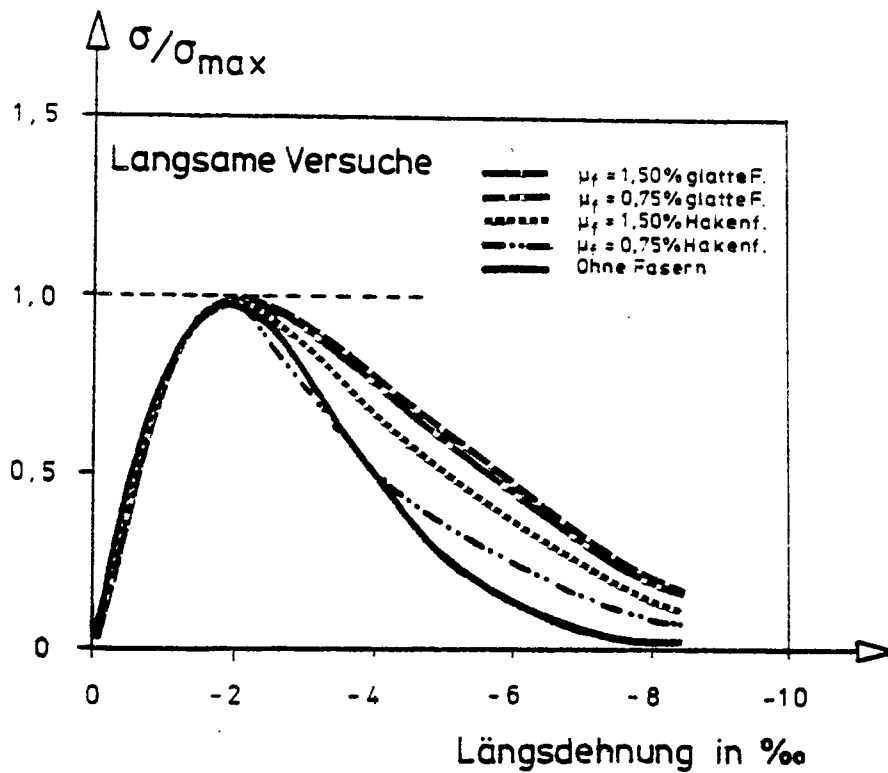
Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$

## Ohne Fasern

## Schnelle Versuche

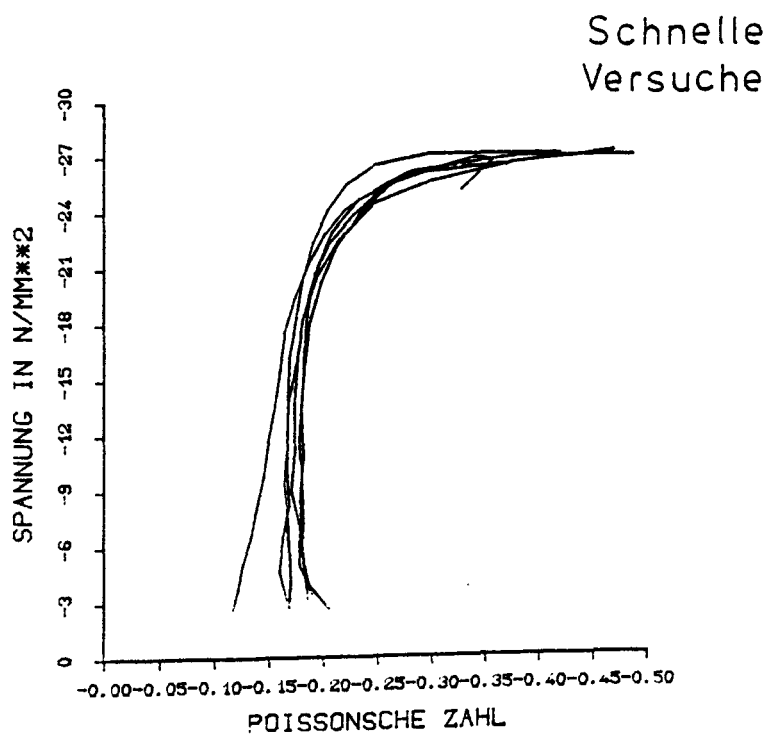
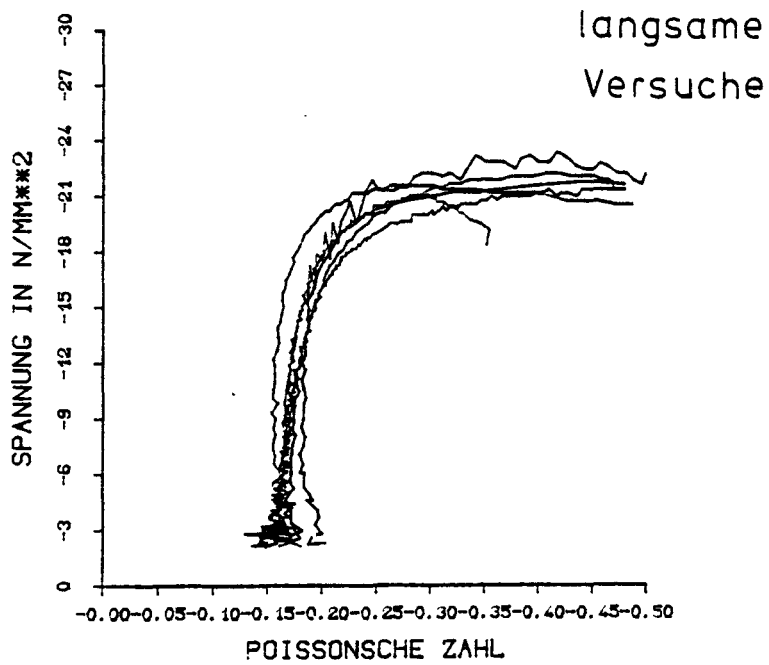


Längsdehnung abgeleitet aus der Messung des Kolbenweges und Volumendehnung der Einzelversuche in Abhängigkeit von der bezogenen Spannung  $\sigma/\sigma_{\max}$



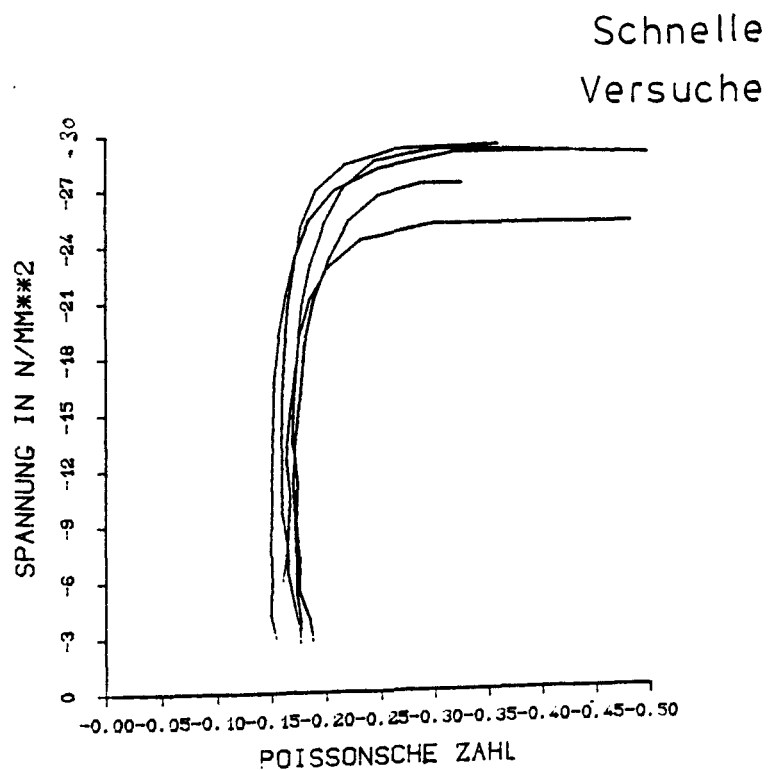
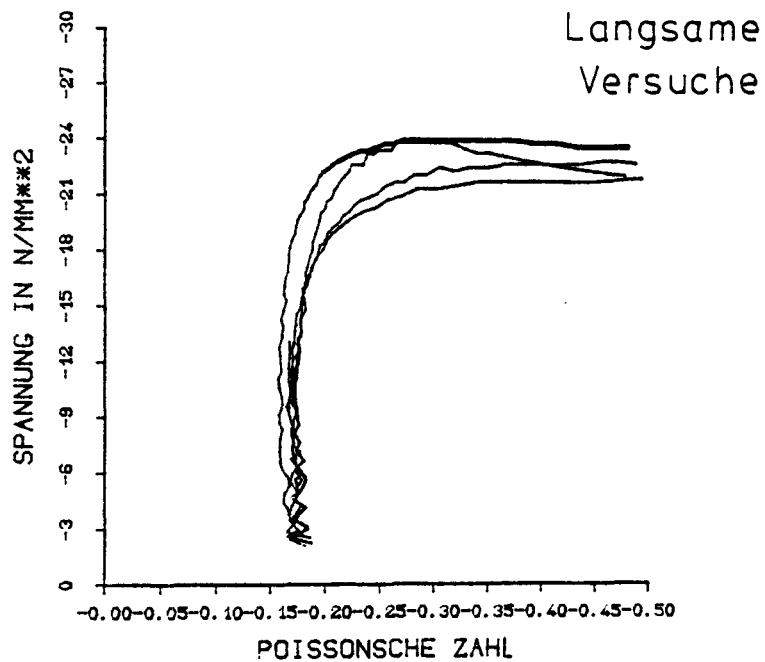
Spannungs-Dehnungslinien zentrisch gedrückter Betone in Abhängigkeit von Faserart und Fasergehalt für langsame und schnelle Versuche

Glatte Fasern

 $\mu_f = 1,50\%$ 

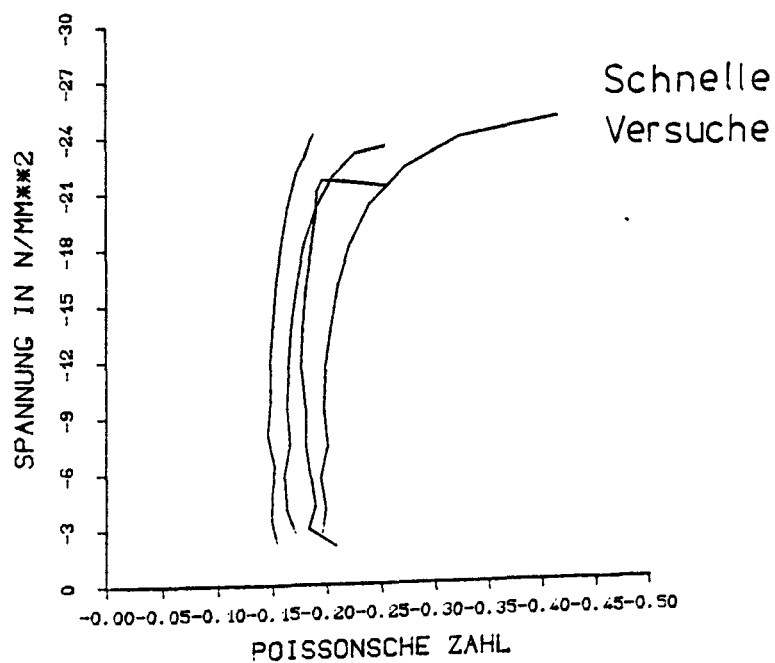
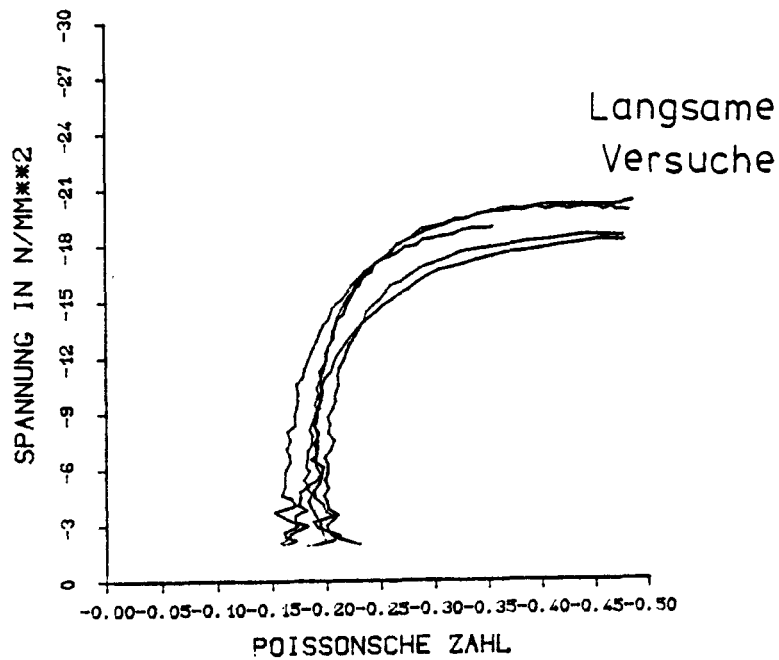
Poisson'sche Zahlen der Einzelversuche für langsame und schnelle Belastungen in Abhängigkeit von der Spannung

Glatte Fasern

 $\mu_f = 0,75\%$ 

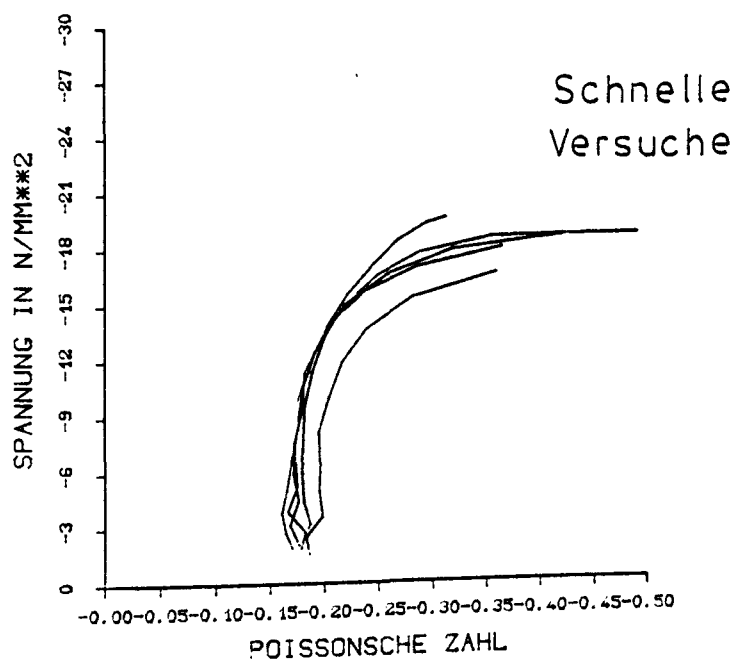
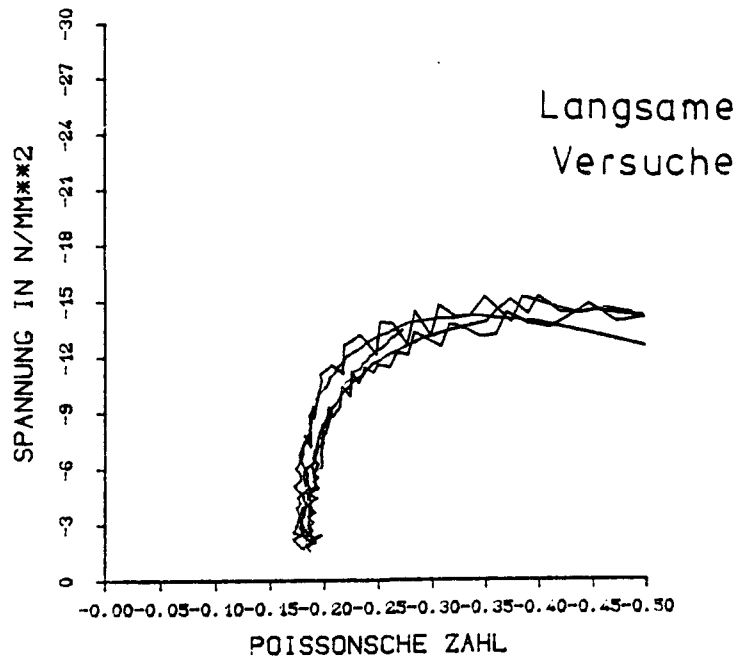
Poisson'sche Zahlen der Einzelversuche für langsame und schnelle Belastungen in Abhängigkeit von der Spannung

Hakenfasern

 $\mu_f = 1,50 \%$ 

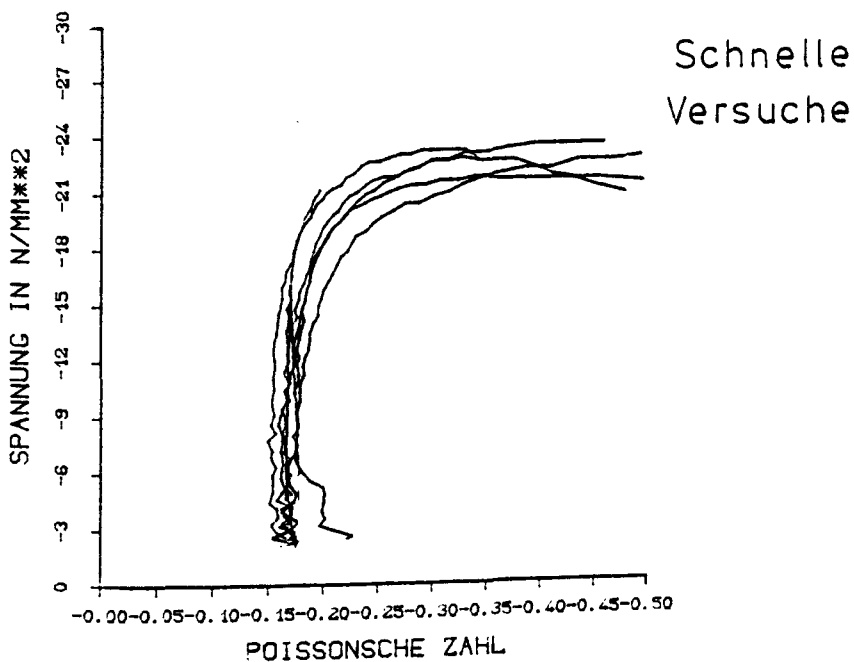
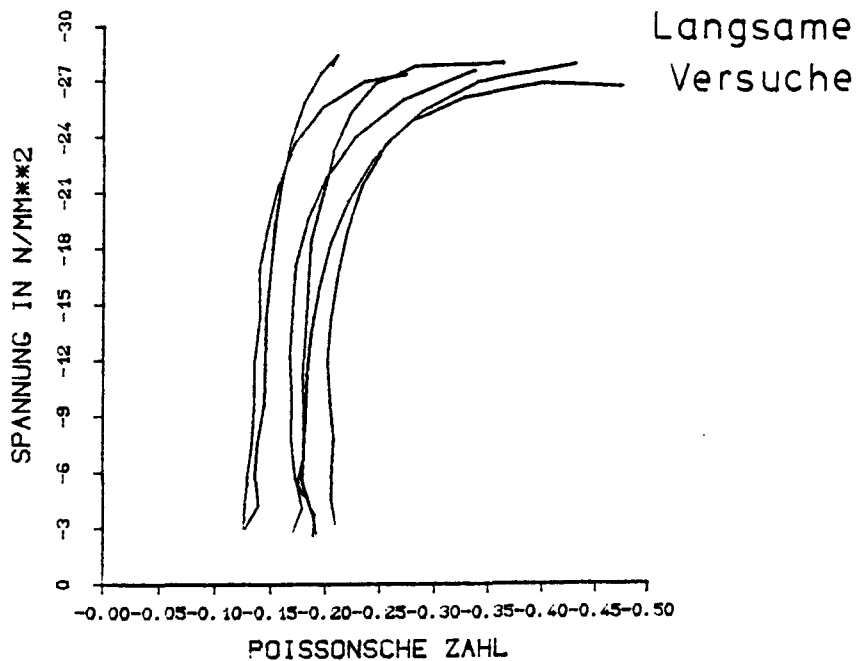
Poisson'sche Zahlen der Einzelversuche für langsame und schnelle Belastungen in Abhängigkeit von der Spannung

Hakenfasern

 $\mu_f = 0,75\%$ 

Poisson'sche Zahlen der Einzelversuche für langsame und schnelle Belastungen in Abhängigkeit von der Spannung

## Ohne Fasern



Poisson'sche Zahlen der Einzelversuche für langsame und schnelle Belastungen in Abhängigkeit von der Spannung



Betonzusammensetzung je m<sup>3</sup> Frischbeton

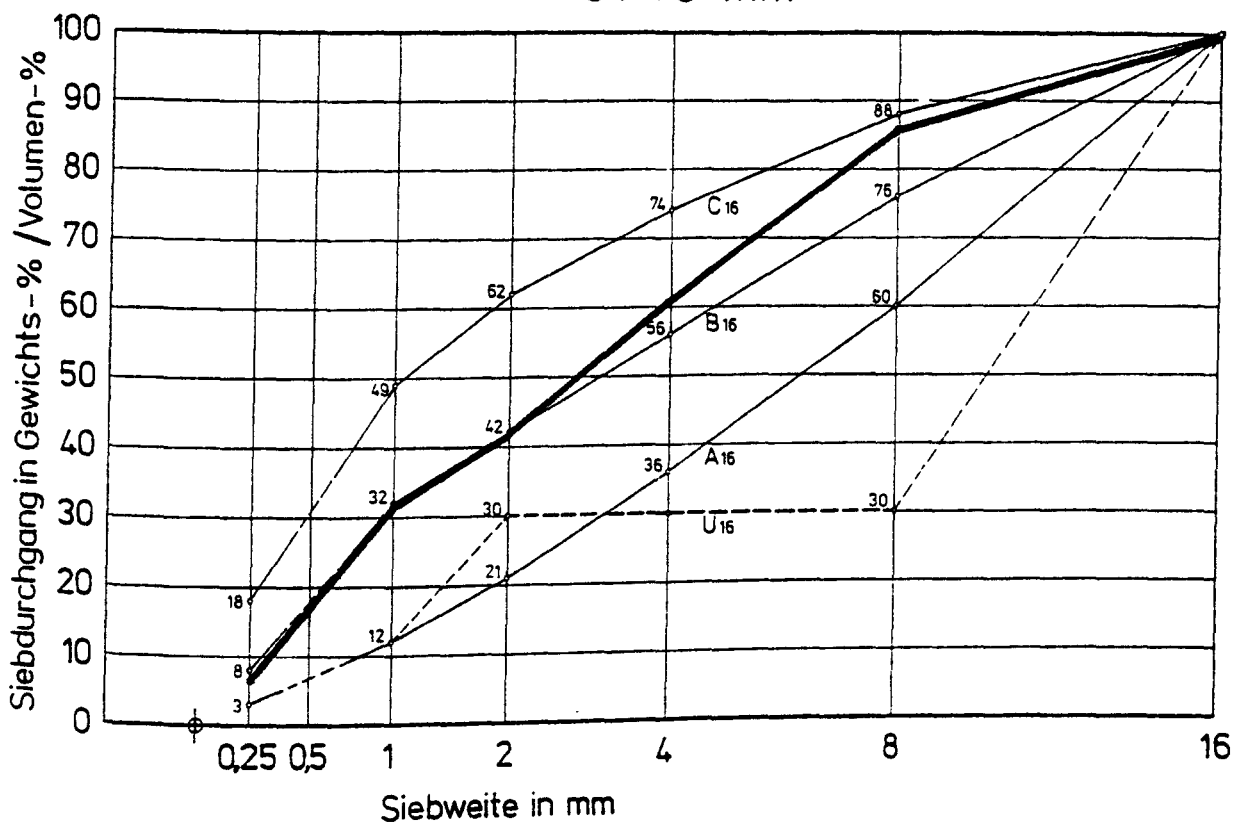
Zement:	PZ 35 F	273,0 kg
Wasser:		218,8 kg
Zuschlag:	0/1 : 10 %	1.717,6 kg
	0/2 : 30 %	
	2/8 : 30 %	
	8/16 : 30 %	

Gesteinsmehl:	Kalkstein	40,0 kg
Stahlfasern:	glatte Fasern: Wirex 0,4/25	(B I)
	Hakenfasern: Dramix ZP 30/.50	(B II)
	$\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$	9,4 kg
	$\mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}$	4,7 kg

Betonverflüssiger: Wörmann BV

Zugabemenge nach Augenschein, bis fließfähiger Beton erreicht wurde

0/16 mm



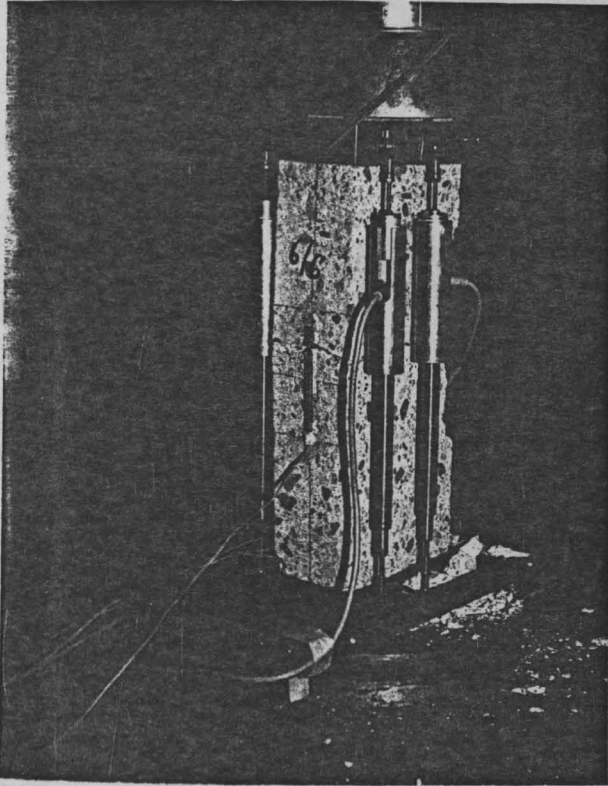


Bild 1:

Riß in der Biegezugzone eines exzentrisch gedrückten Betonprismas

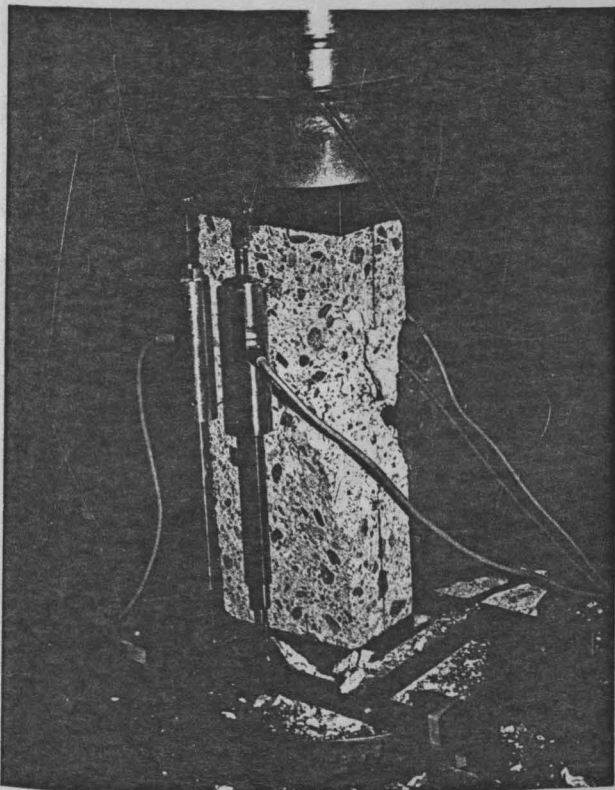
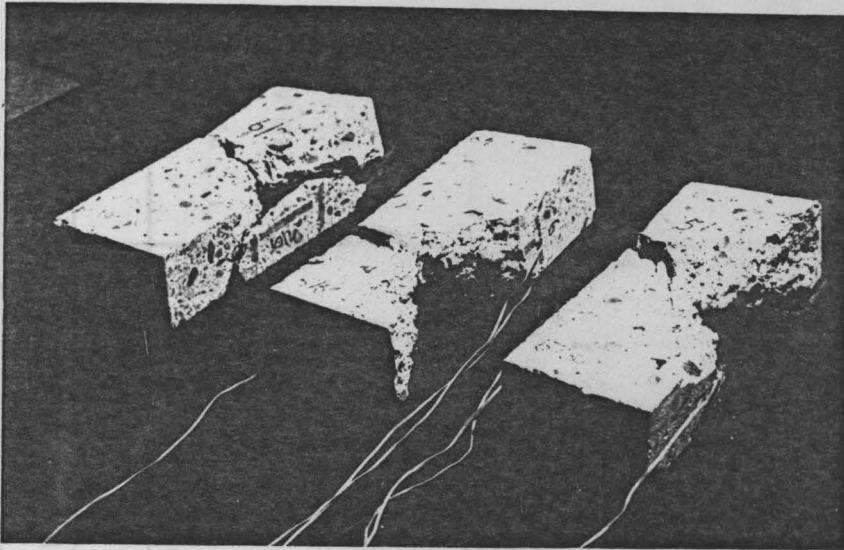


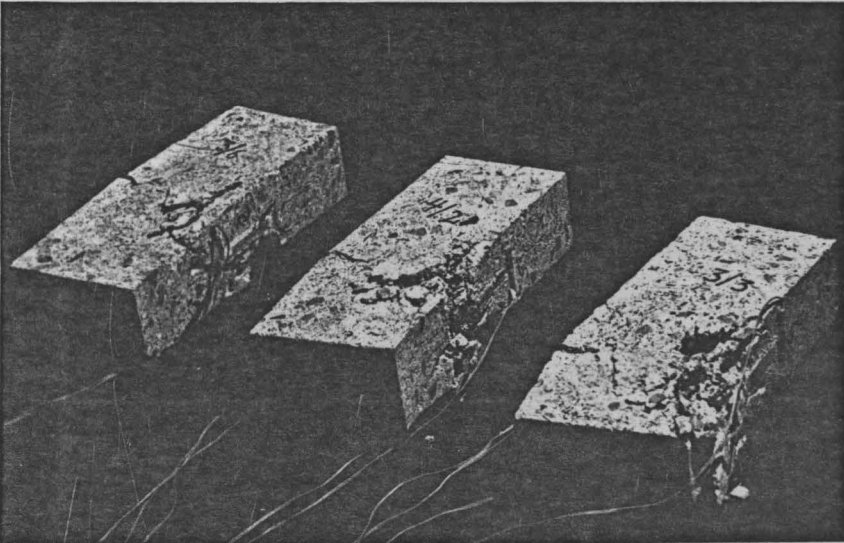
Bild 2:

Ausbruch der Biegedruckzone eines Normalbetonprobekörpers

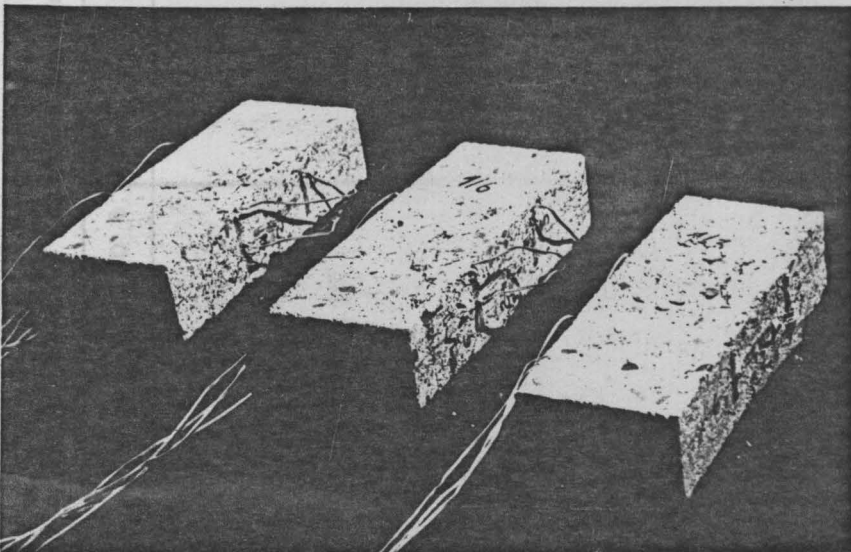
Bruchbilder langsam belasteter Betone der Serie B II (Hakenfasern)



ohne Fasern



$\mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}$



$\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$

Art des Biegedruckbruches schnell exzentrisch belasteter Proben der Serie B I (glatte Fasern) in Abhängigkeit vom Fasergehalt

Exzentrische Druckfestigkeit $\beta$ in N/mm <sup>2</sup> (Vorlastniveau $\alpha$ ) *						
Belastungs- art	glatte Fasern (B I)			Hakenfasern (B II)		
	$\mu_f = 1,50 \%$	$\mu_f = 0,75 \%$	$\mu_f = 0 \%$	$\mu_f = 1,50 \%$	$\mu_f = 0,75 \%$	$\mu_f = 0 \%$
langsam	23,48	22,80	./.	20,16	17,28	22,60
	23,48	25,63	20,35	20,41	17,55	20,03
	26,38	24,31	20,80	19,68	17,23	19,81
			21,67	21,13	17,83	19,42
schnell	29,96	28,49	26,81	23,56	19,64	24,98
	29,02	29,51	25,23	24,94	20,85	23,08
	31,17	29,13	25,34	25,19	./.	23,85
				25,58	22,17	22,75
schnell + langsam	24,34 (0,89)	23,86 (0,98)	20,84 (0,94)	19,00 (0,84)	16,47 (0,94)	21,17 (1,06)
	22,98 (0,92)	22,80 (0,98)	20,49 (1,02)	21,63 (0,95)	17,51 (0,94)	21,05 (0,78)
		23,26 (0,95)	21,19 (1,08)	18,78 (0,86)	./.	20,42 (0,99)
				21,05 (0,88)		21,13 (0,92)

\*  $\alpha = \sigma_{SV} / \beta_{\text{langsam}}$   $\sigma_{SV}$ : max. Spannung bei schneller Vorlast

Zusammenstellung der exzentrischen Druckfestigkeitswerte aus den Einzelversuchen und Angabe der Vorlasthöhe

Exzentrische Druckfestigkeit $\beta_D$ in N/mm <sup>2</sup>								
Belastungsart	glatte Fasern (B I)				Hakenfasern (B II)			
	$\mu_f = 1,50 \%$	$\mu_f = 0,75 \%$	$\mu_f = 0$	V *	$\mu_f = 1,50 \%$	$\mu_f = 0,75 \%$	$\mu_f = 0$	V *
langsam	24,45 (100 %)	24,25 (100 %)	20,94 (100 %)	4,51 %	20,35 (100 %)	17,47 (100 %)	20,47 (100 %)	3,91 %
schnell	30,05 (122,9 %)	29,04 (119,8 %)	25,79 (123,2 %)	2,48 %	24,82 (122,0 %)	20,89 (119,6 %)	23,67 (115,6 %)	3,86 %
schnell + langsam	23,66 (96,8 %)	23,31 (96,1 %)	20,84 (99,5 %)	2,02 %	20,12 (98,9 %)	16,99 (97,3 %)	20,94 (102,3 %)	4,25 %

\* Variationskoeffizient

Zusammenstellung der mittleren Druckfestigkeiten exzentrisch belasteter Betone

Bruchdehnungen $\epsilon_{D,u}$ und $\epsilon_{Z,u}$ in %						
Belastungs- art	Serie B II: Hakenfasern					
	$\mu_f = 1,50 \%$		$\mu_f = 0,75 \%$		$\mu_f = 0 \%$	
	$\epsilon_{D,u}$	$\epsilon_{Z,u}$	$\epsilon_{D,u}$	$\epsilon_{Z,u}$	$\epsilon_{D,u}$	$\epsilon_{Z,u}$
langsam	- 3,01	0,518	- 2,80	0,316	- 2,20	0,139
	- 3,62	1,18	- 2,10	0,218	- 2,80	0,281
	./.	./.	- 2,55	0,278	- 2,91	0,249
	- 3,91	0,702	- 2,58	0,274	- 2,62	0,412
Mittel	- 3,51 (100 %)	./.	- 2,75 (100 %)	./.	- 2,63 (100 %)	./.
schnell	- 3,14	0,352	- 1,65 *	1,23	- 2,70	0,437
	- 3,27 *	1,30	- 2,79	0,175	- 3,57	0,676
	- 3,68	1,10	./.	./.	- 2,70	0,06
	- 3,51	0,724	- 2,79	0,276	- 2,95	0,245
Mittel	- 3,40 (96,9 %)	./.	- 2,41 (87,6%)	./.	- 2,98 (113,3%)	./.
schnell + langsam	- 4,31	0,667	- 2,41	0,253	- 2,31	0,273
	- 3,79	0,750	- 2,28	0,412	- 2,60	0,183
	- 2,91	0,340	./.	./.	- 3,12	0,490
	- 3,81	1,07	./.	./.	- 2,97	0,451
Mittel	- 3,71 (105,6 %)	./.	- 2,35 (85,3 %)	./.	- 2,75 (104,6%)	./.

\* letzter Meßwert vor Ausfall des DMS

Zusammenstellung der Bruchdehnungswerte  $\epsilon_{D,u}$  und  $\epsilon_{Z,u}$  exzentrisch belasteter Betonprismen der Serie B I (glatte Fasern)

Bruchdehnungen $\epsilon_{D,u}$ und $\epsilon_{Z,u}$ in %						
Belastungs- art	Serie B I: glatte Fasern					
	$\mu_f = 1,50 \%$		$\mu_f = 0,75 \%$		$\mu_f = 0 \%$	
	$\epsilon_{D,u}$	$\epsilon_{Z,u}$	$\epsilon_{D,u}$	$\epsilon_{Z,u}$	$\epsilon_{D,u}$	$\epsilon_{Z,u}$
langsam	- 4,88 *	1,61	- 3,37	0,507	- 2,29	0,351
	- 3,19	1,17	- 2,19	0,777	- 3,17	0,373
	- 5,97 *	2,03 *	- 4,00	0,804	- 3,46	0,548
Mittel	- 4,68 (100 %)	./.	- 3,19 (100 %)	./.	- 2,97 (100 %)	./.
schnell	- 4,81 *	2,22	- 3,77	0,624	- 3,78	0,434
	- 4,70 *	2,07	- 3,82	0,570	- 2,91 *	0,275
	- 7,20	1,40	- 4,10	0,604	- 3,34	0,495
Mittel	- 5,57 (119,0 %)	./.	- 3,90 (122,3%)	./.	- 3,34 (112,6%)	./.
schnell + langsam	./.	./.	- 3,21	0,729	- 2,47	0,200
	- 6,11	2,89	- 3,46	0,548	- 4,28	0,748
	- 4,04	0,855	- 4,02	0,602	- 3,91	0,884
Mittel	- 5,08 (108,4 %)	./.	- 3,56 (111,7%)	./.	- 3,55 (119,6%)	./.

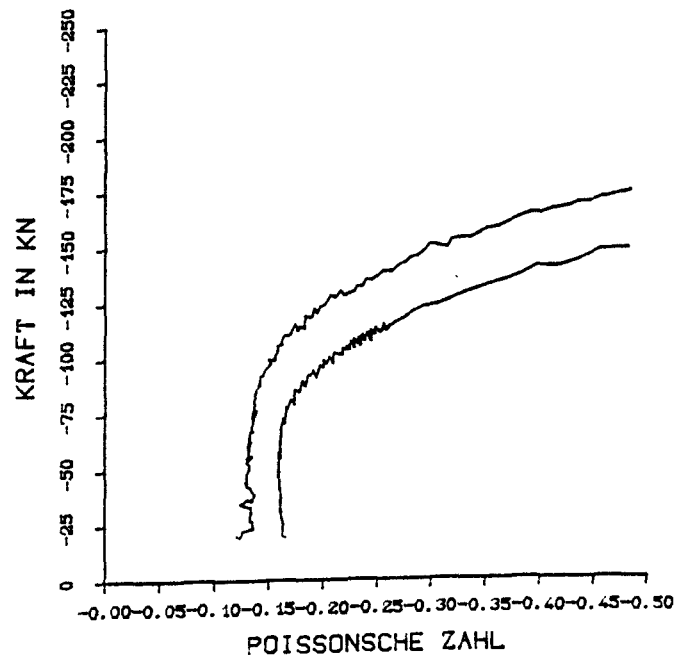
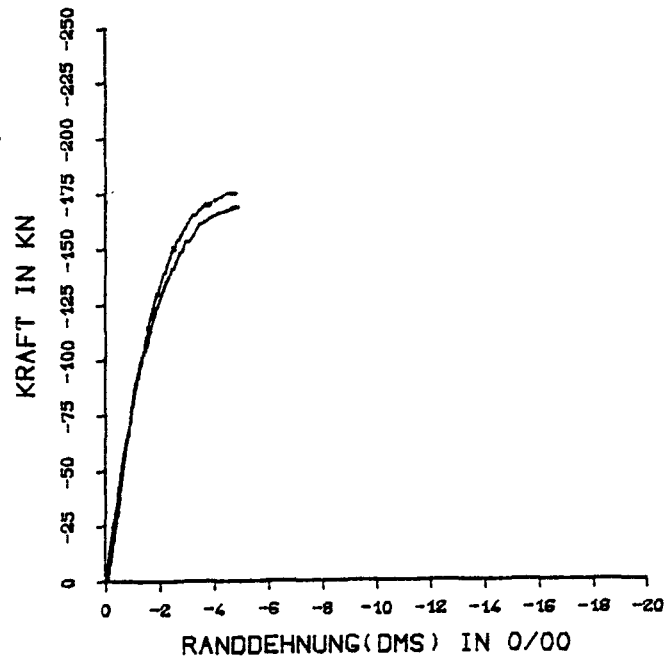
\* letzter Meßwert vor Ausfall des DMS

Zusammenstellung der Bruchdehnungswerte  $\epsilon_{D,u}$  und  $\epsilon_{Z,u}$  exzentrisch belasteter Betonprismen der Serie B II (Hakenfasern)

SERIE B I:

Glatte Fasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Langsame Versuche



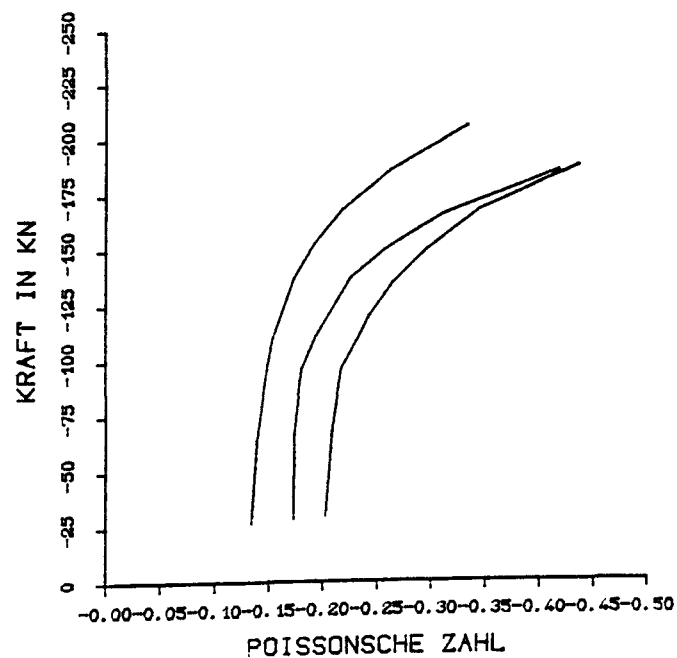
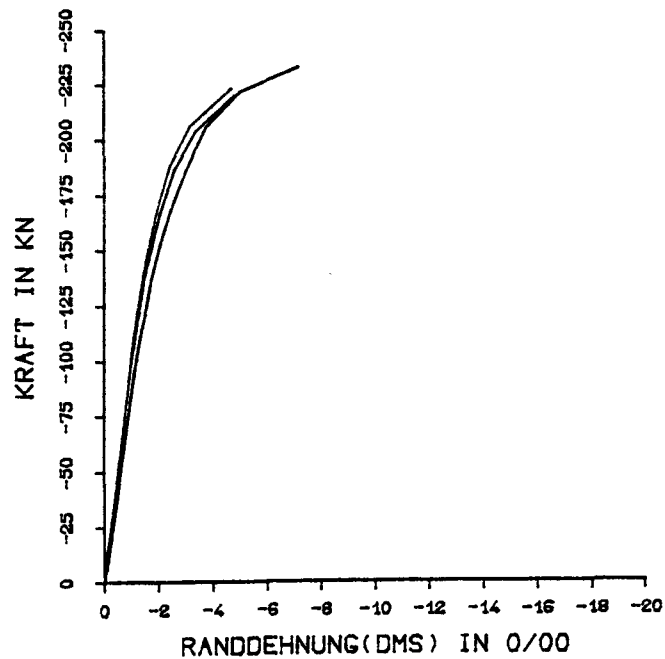
Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter  
 Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für  
 sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe



SERIE B I:

Glatte Fasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Schnelle Versuche



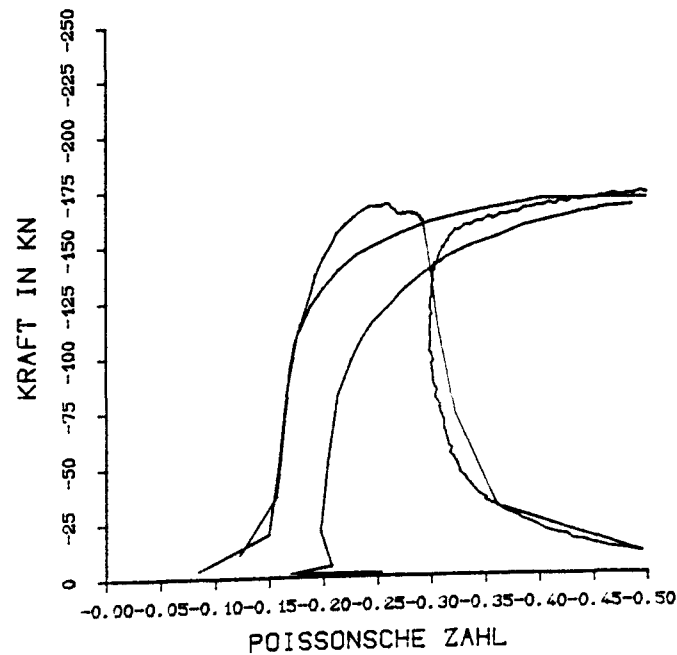
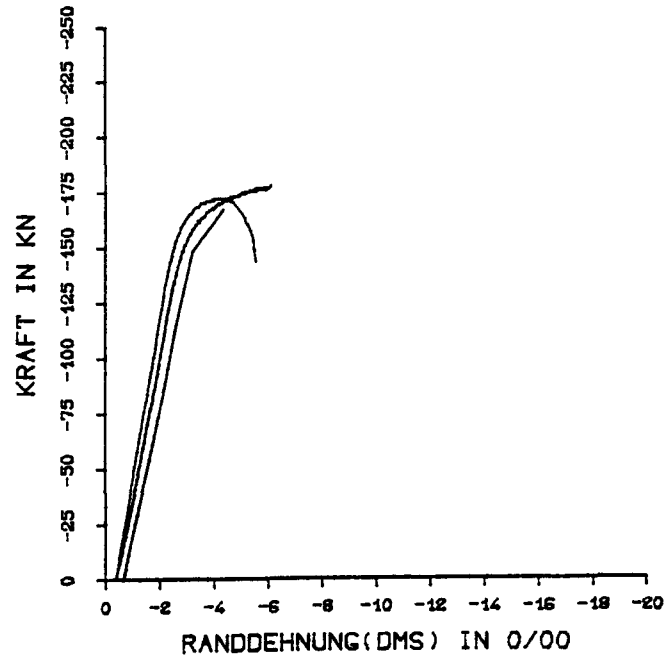
Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter  
 Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für  
 sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B I:

Glatte Fasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Langsame Versuche

nach schneller Vorlast

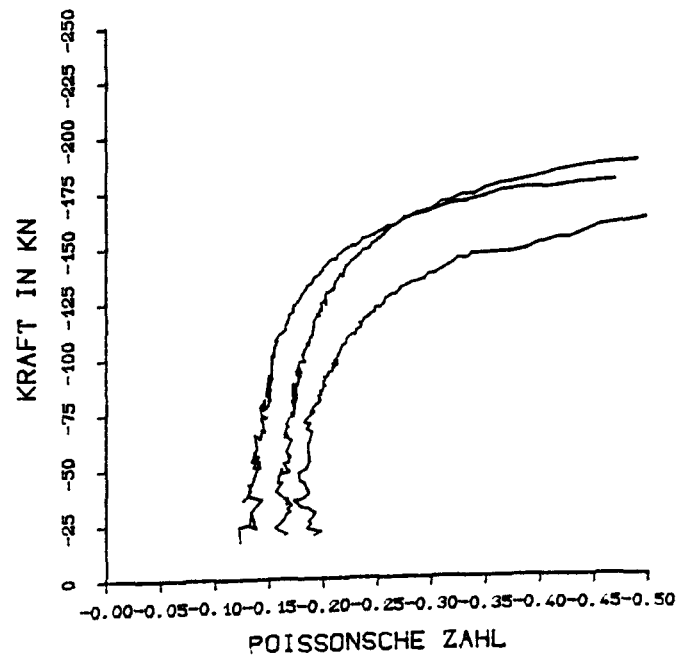
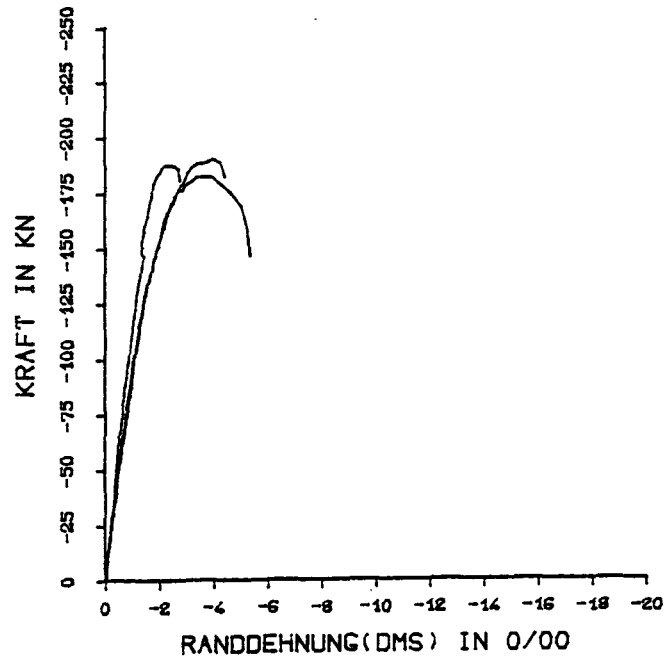


Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter  
Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für  
sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B I:

Glatte Fasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Langsame Versuche

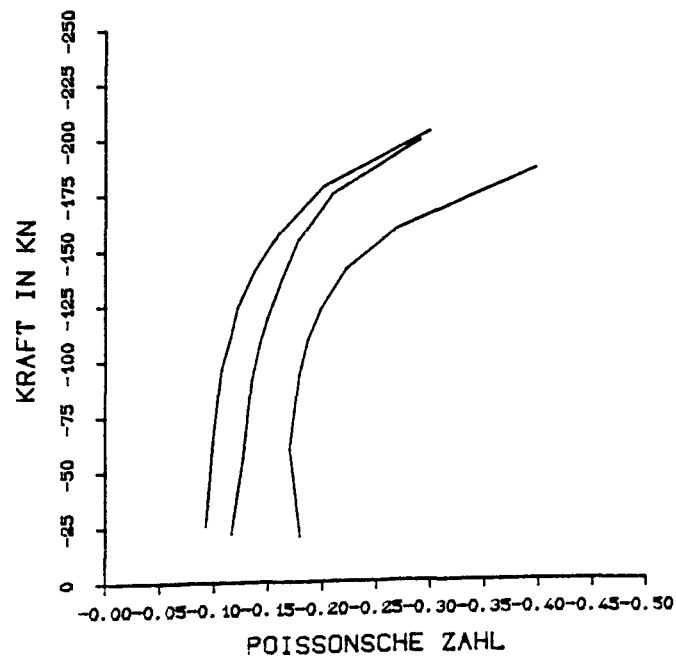
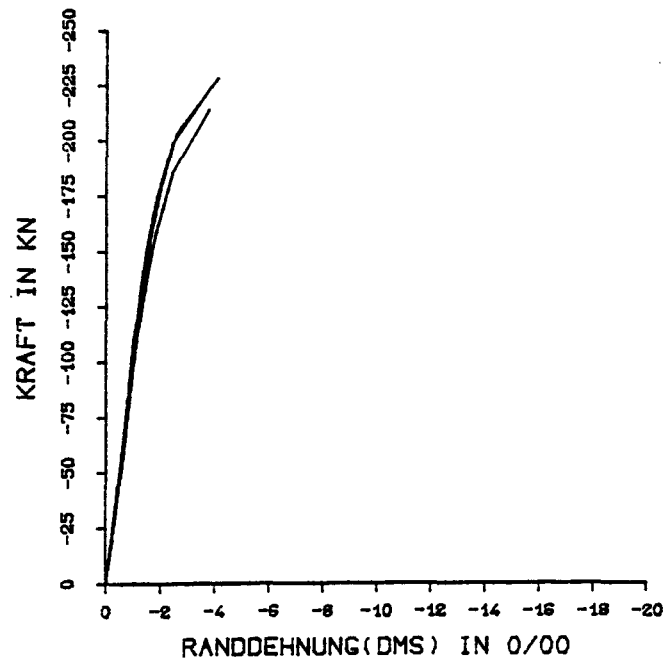


Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B I:

Glatte Fasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Schnelle Versuche



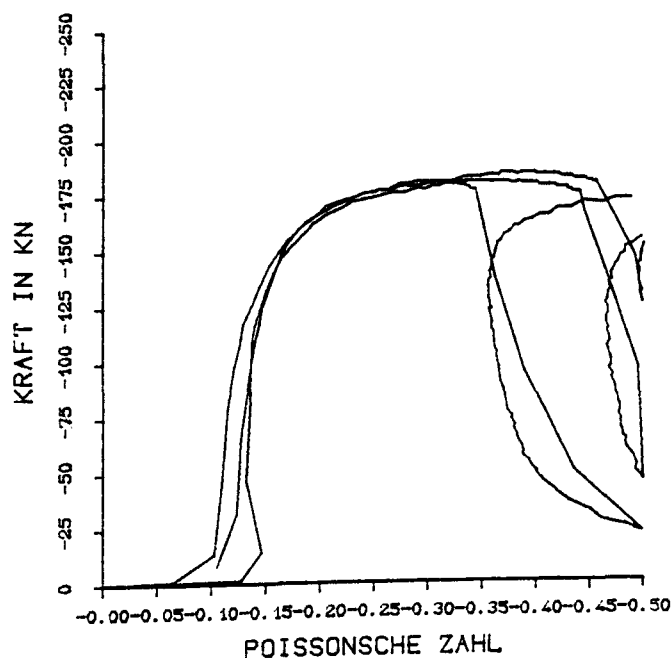
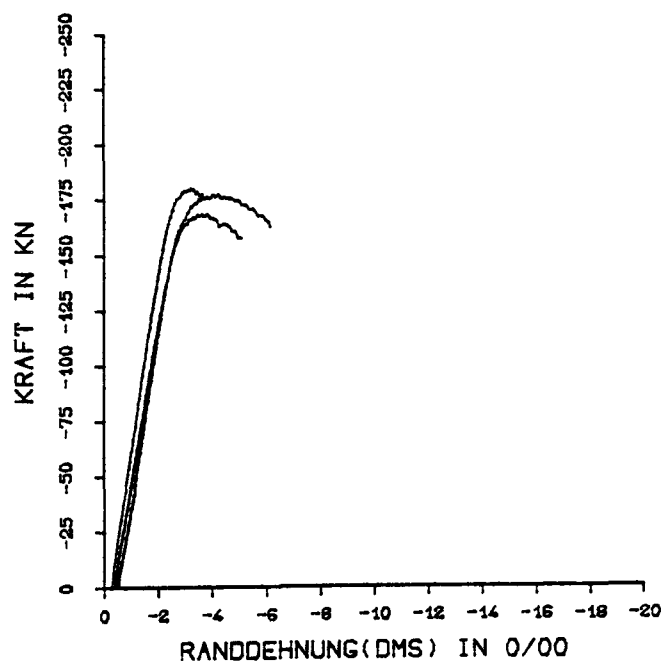
Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter  
 Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für  
 sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B I:

Glatte Fasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Langsame Versuche

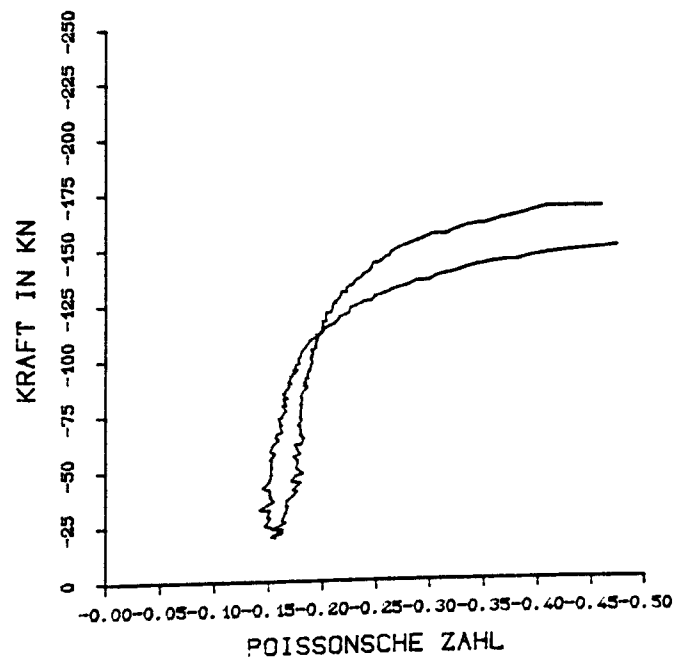
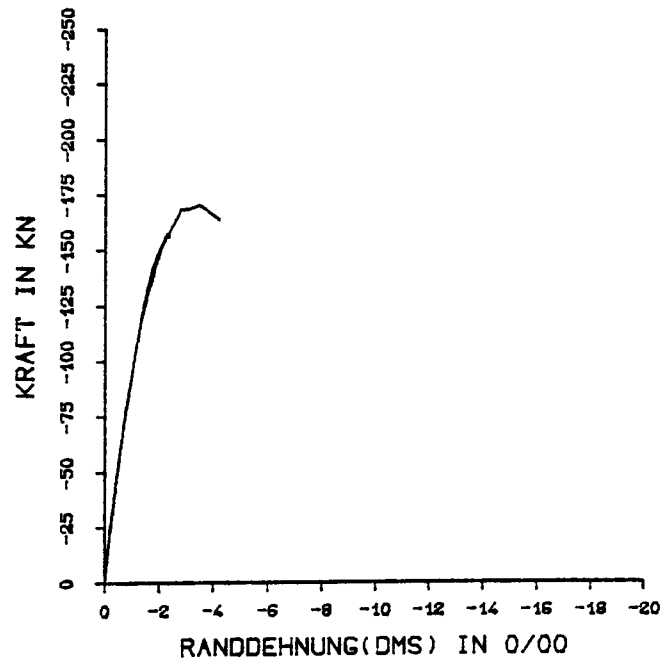
nach schneller Vorlast



Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

# SERIE B I: Ohne Fasern

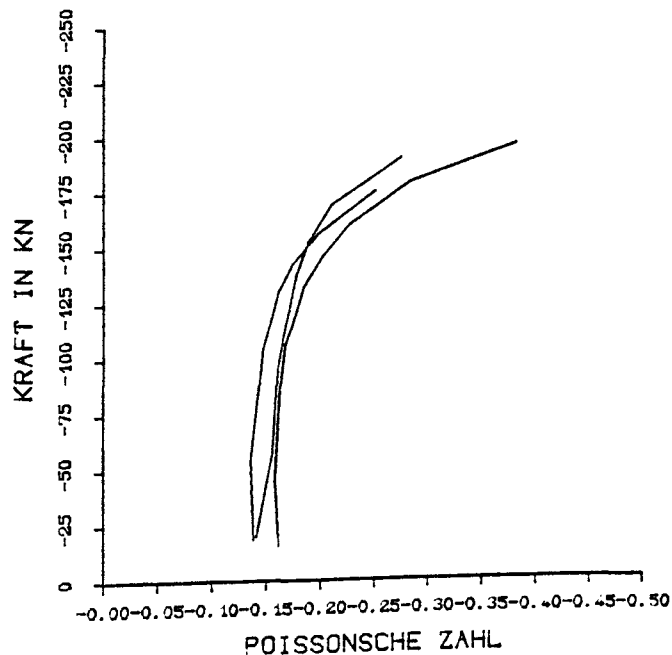
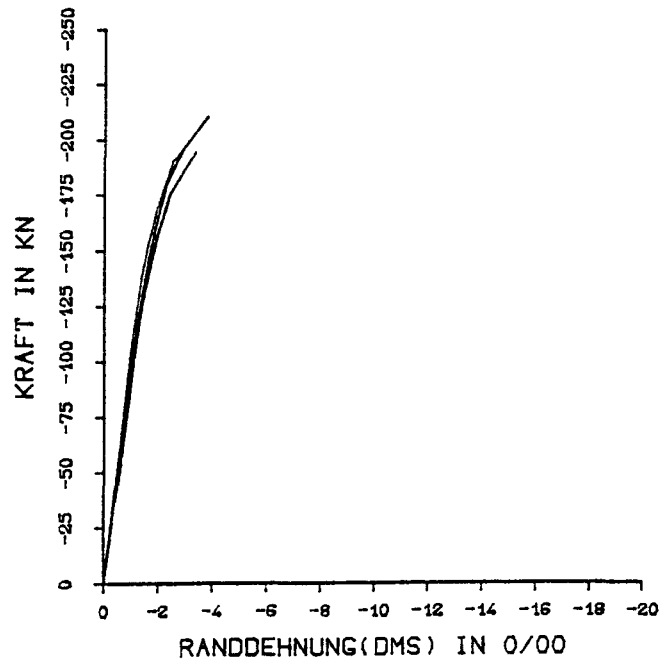
Langsame Versuche



Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B I:  
Ohne Fasern

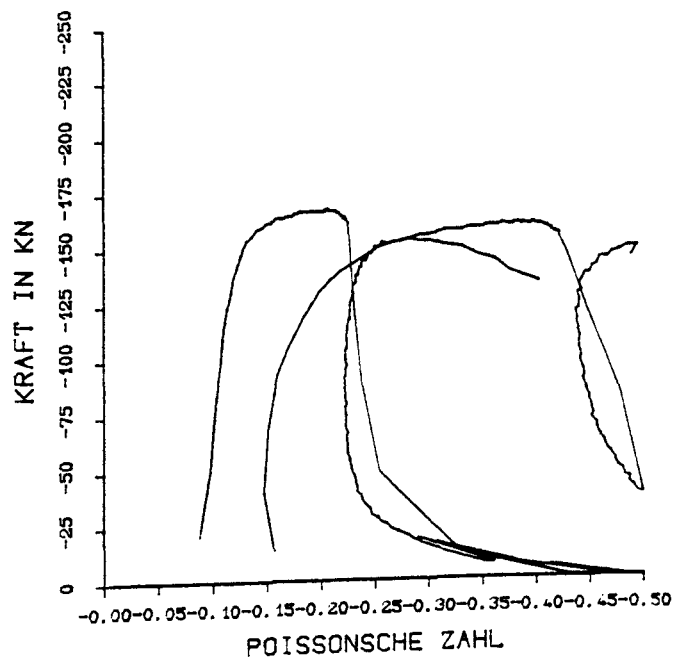
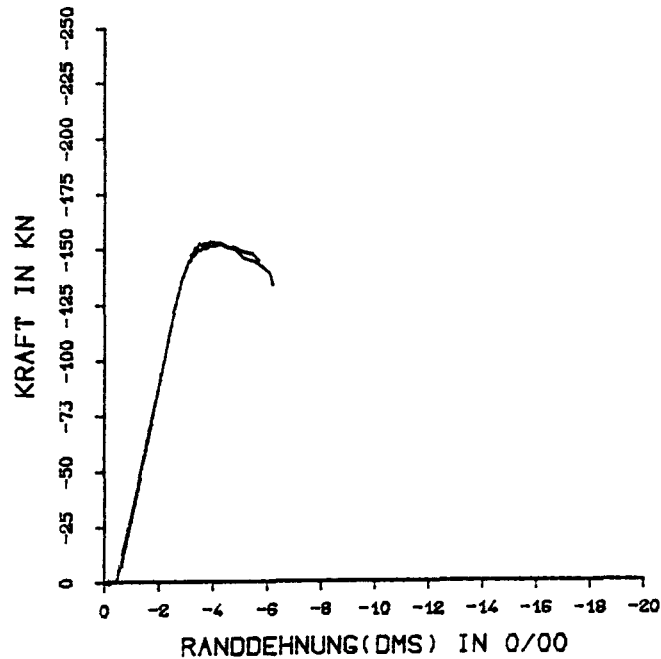
Schnelle Versuche



Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B I:  
Ohne Fasern

Langsame Versuche  
nach schneller Vorlast



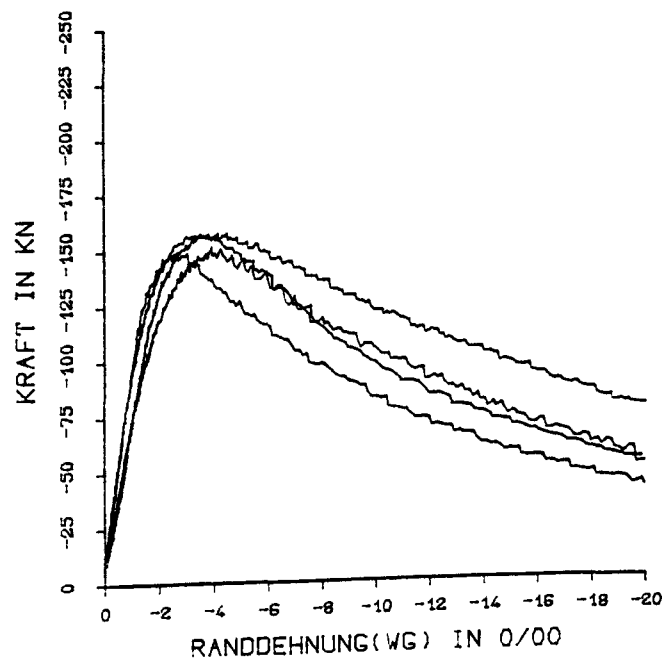
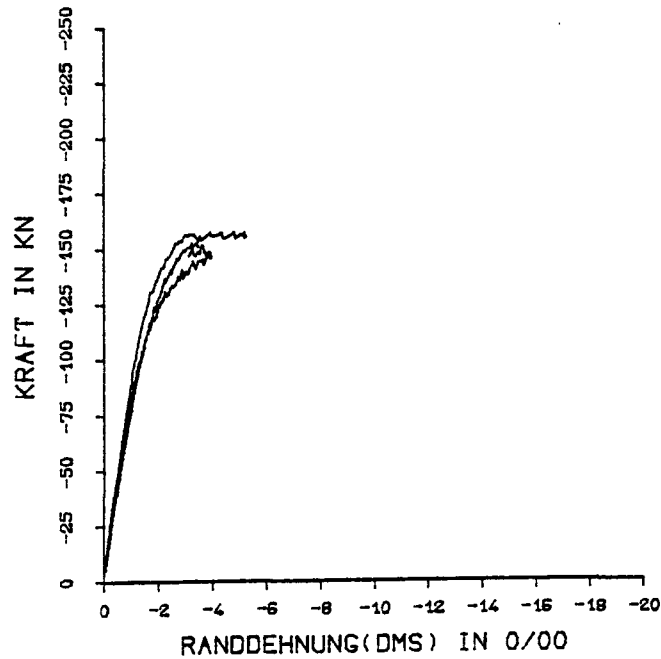
Randdehnung und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter  
Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für  
sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe



SERIE B II:

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Langsame Versuche

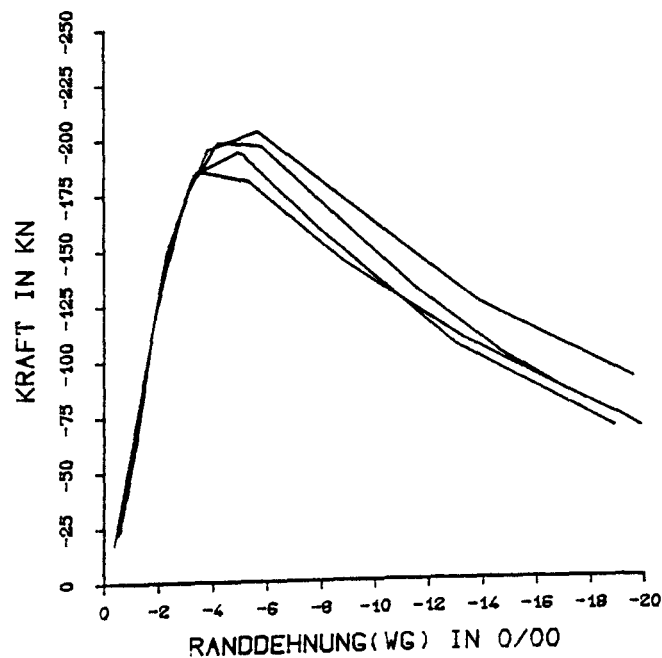
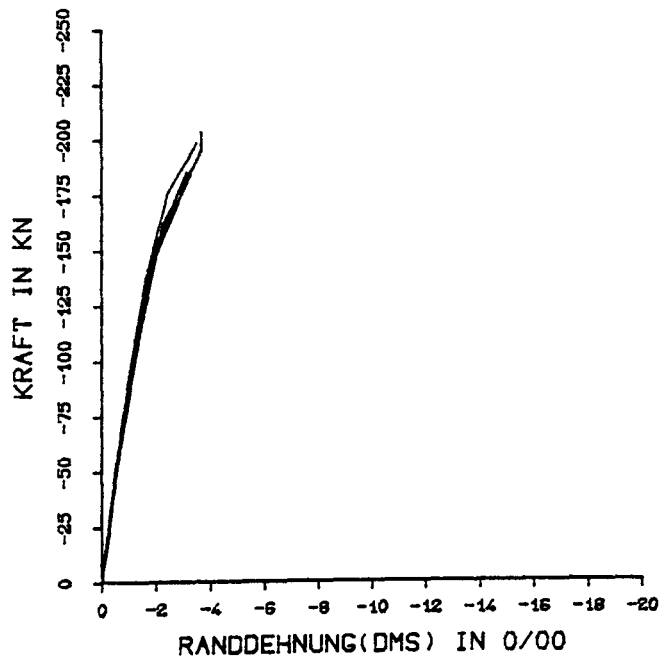


Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II:

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Schnelle Versuche



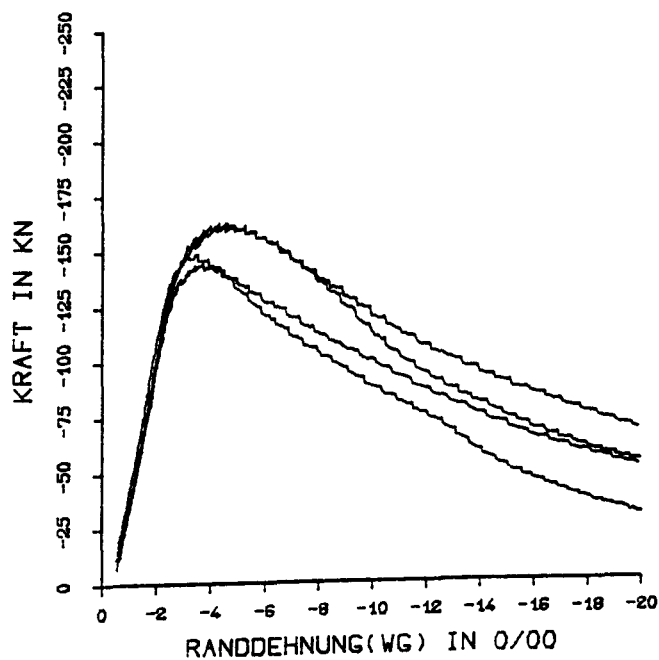
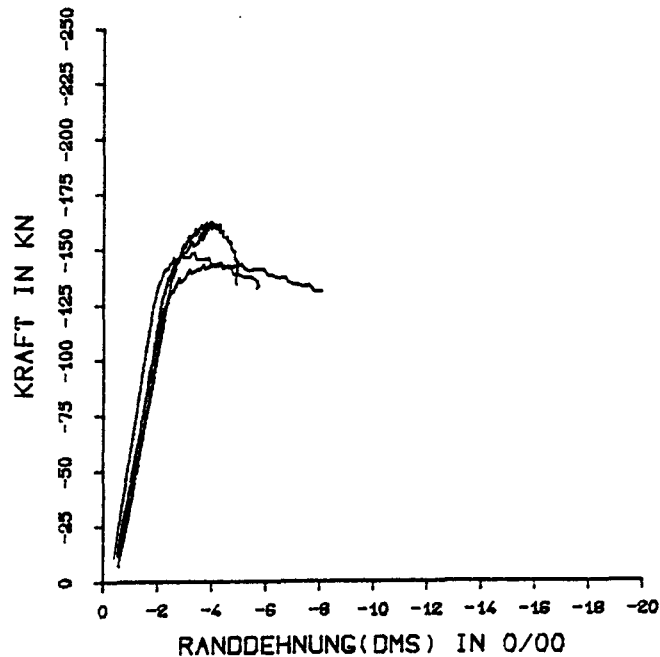
Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II:

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Langsame Versuche

nach schneller Vorlast

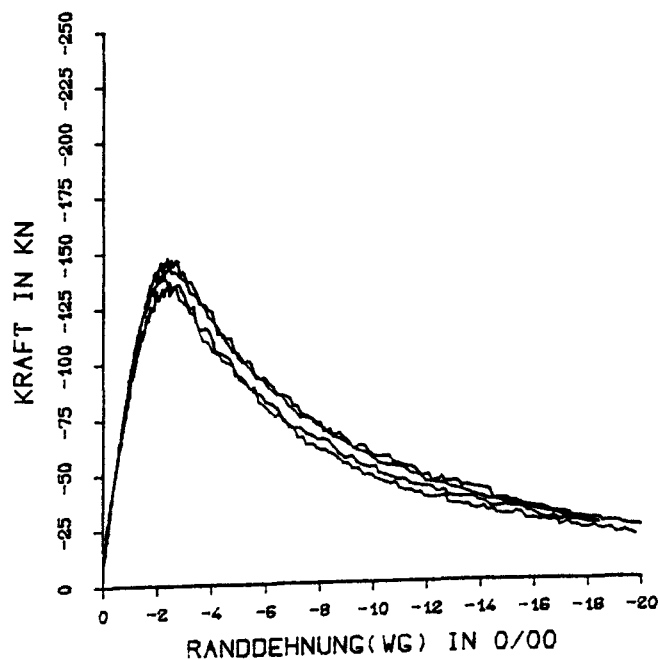
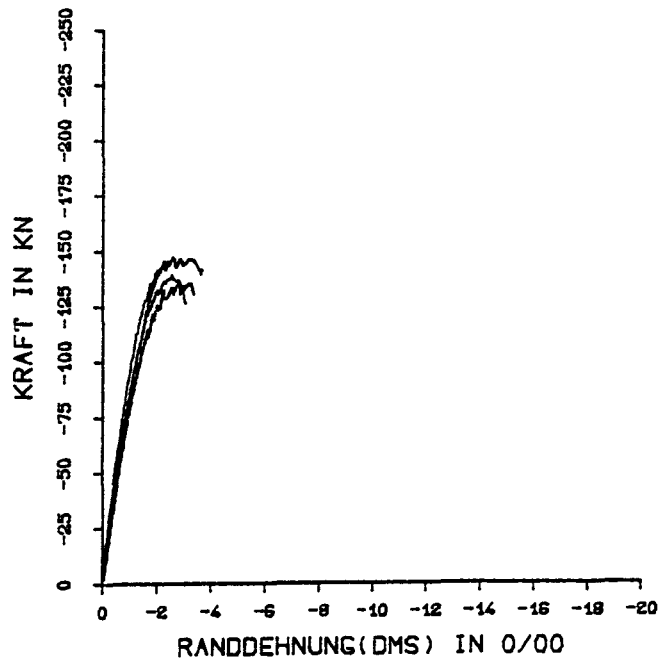


Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Langsame Versuche

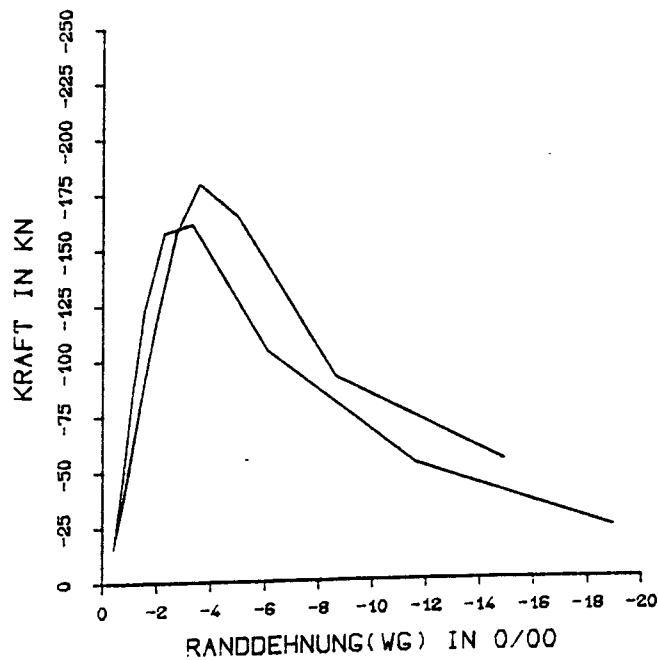
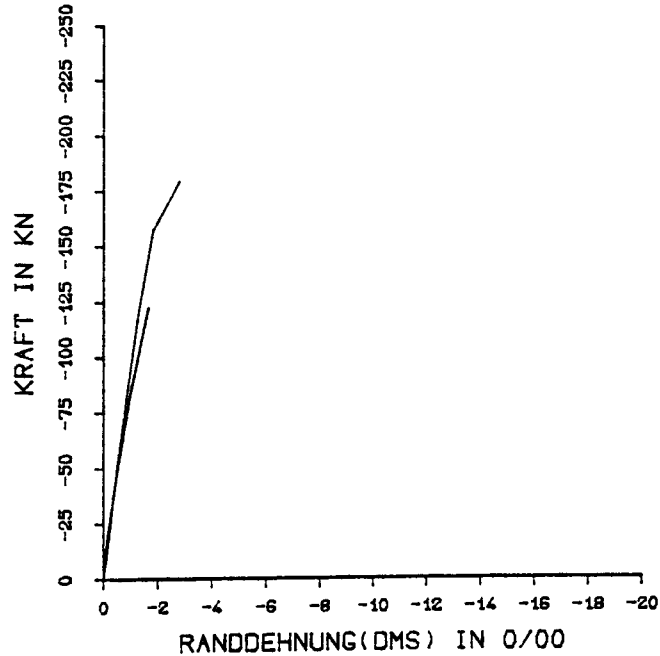


Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Schnelle Versuche



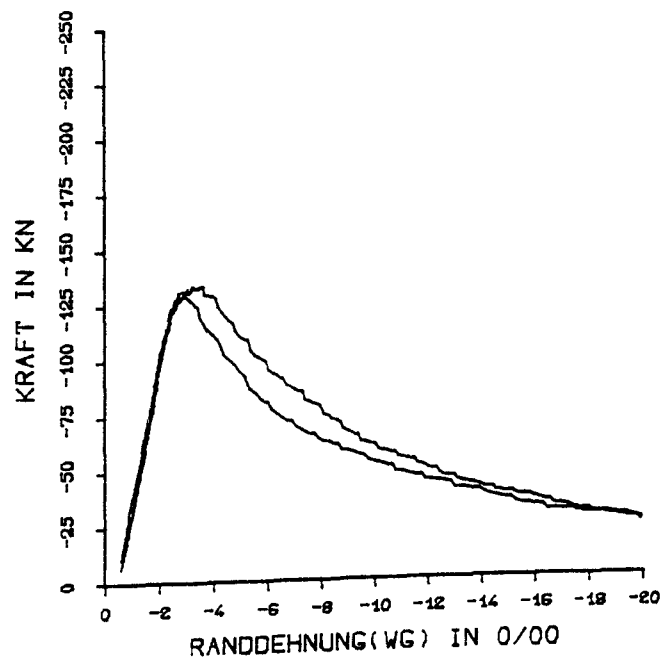
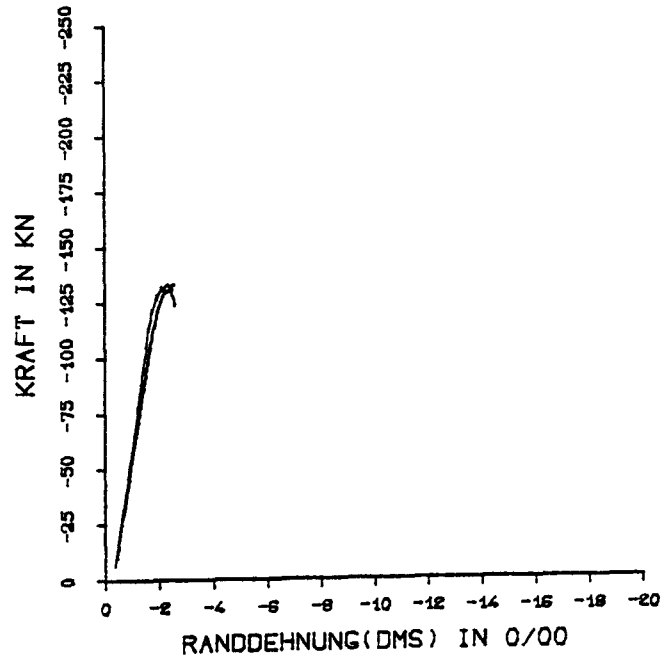
Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Langsame Versuche

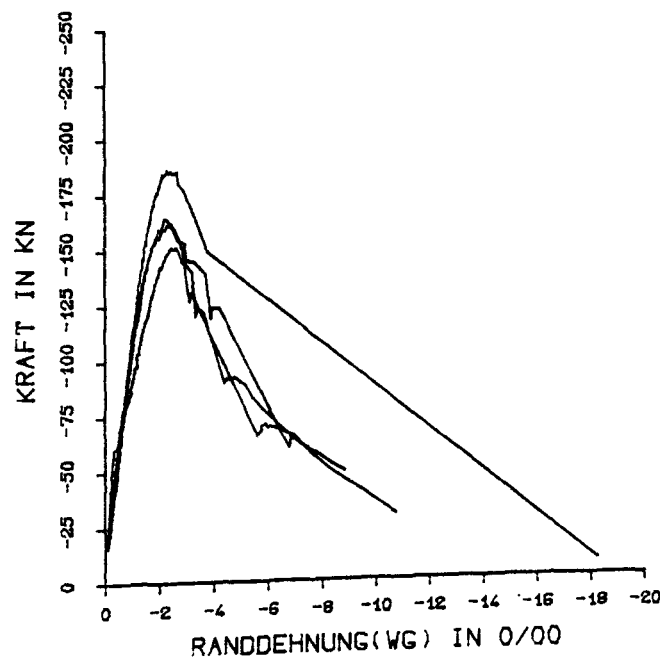
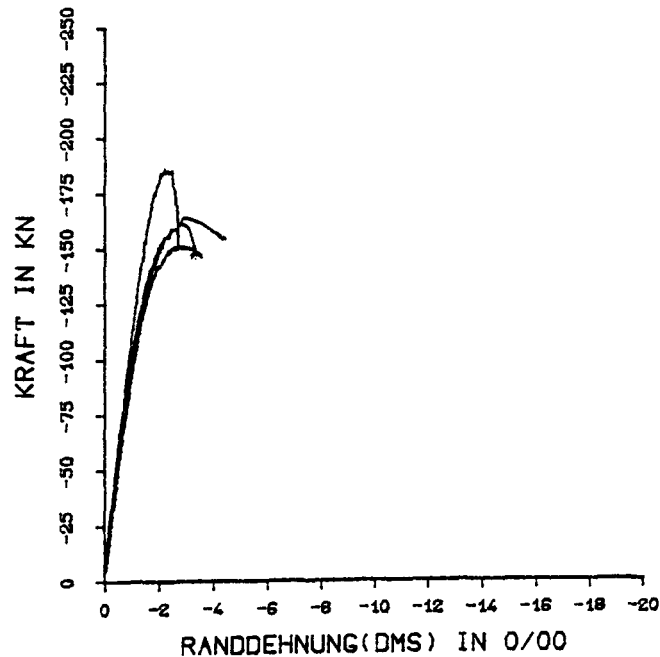
nach schneller Vorlast



Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :  
Ohne Fasern

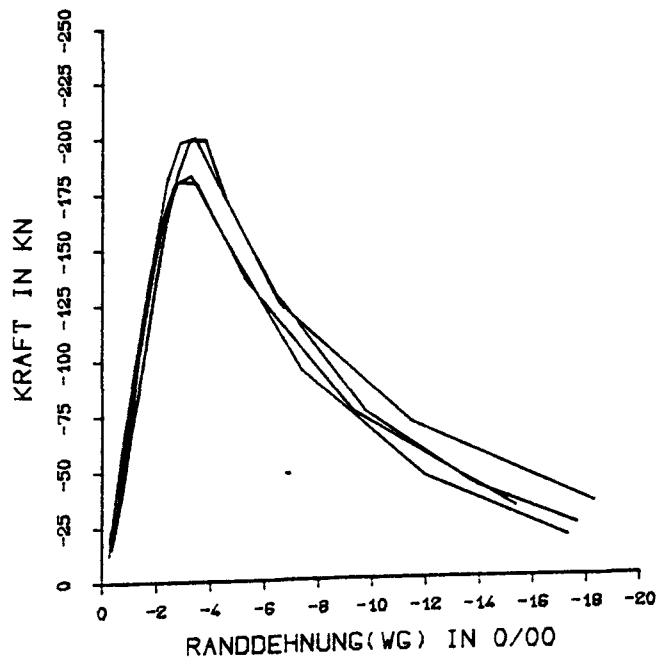
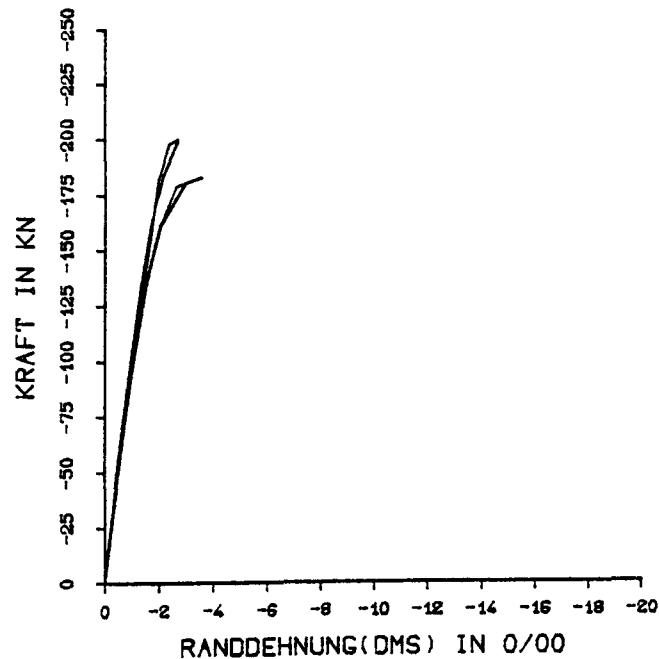
Langsame Versuche



Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmessstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :  
Ohne Fasern

Schnelle Versuche

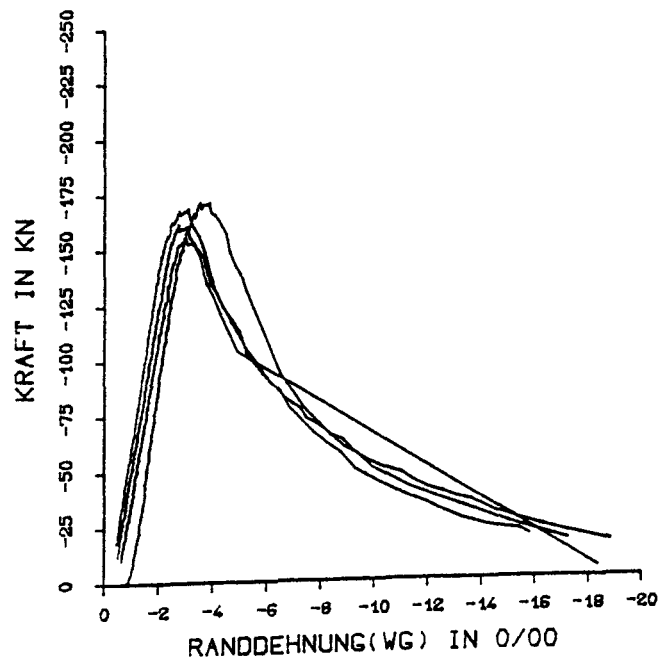
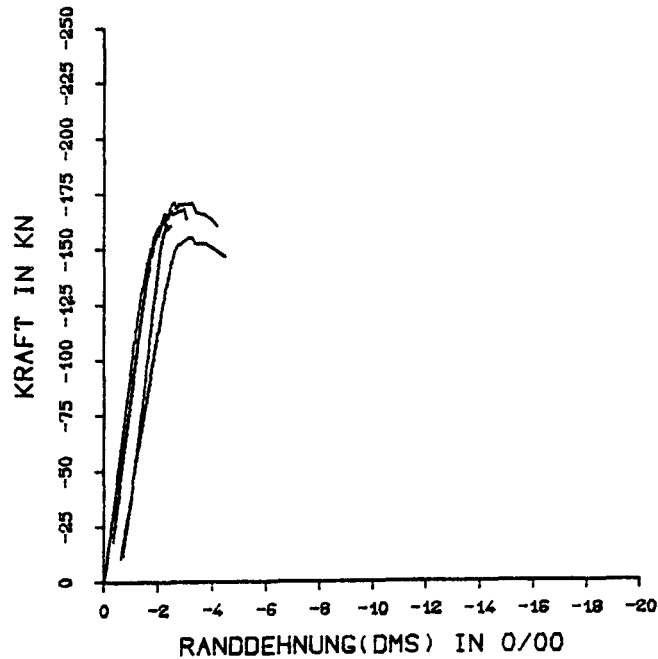


Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe



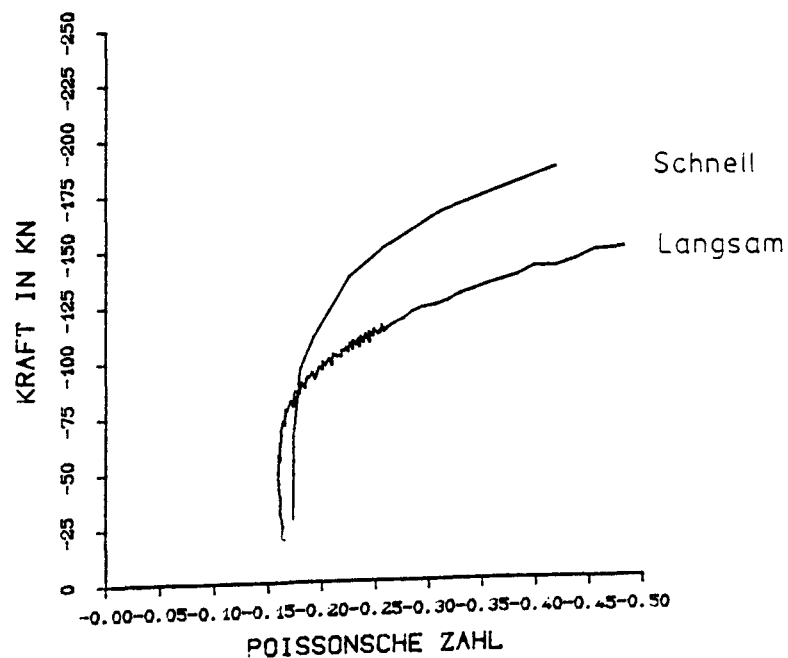
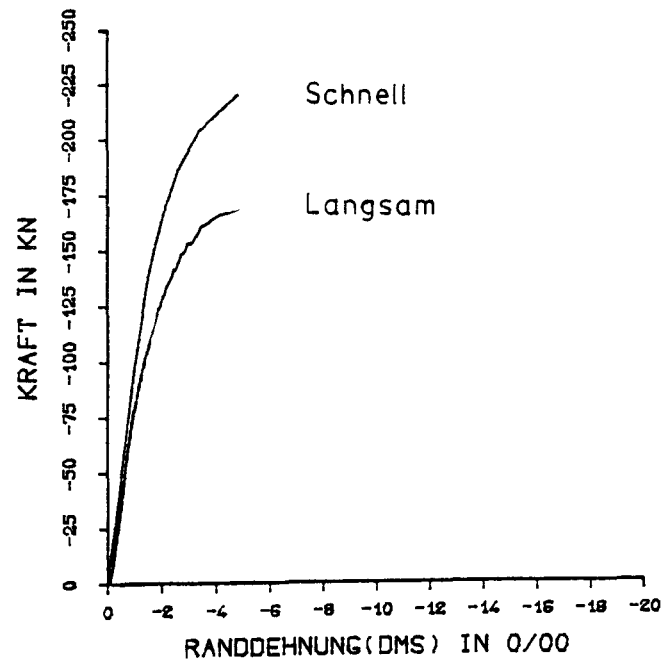
SERIE B II :  
Ohne Fasern

Langsame Versuche  
nach schneller Vorlast



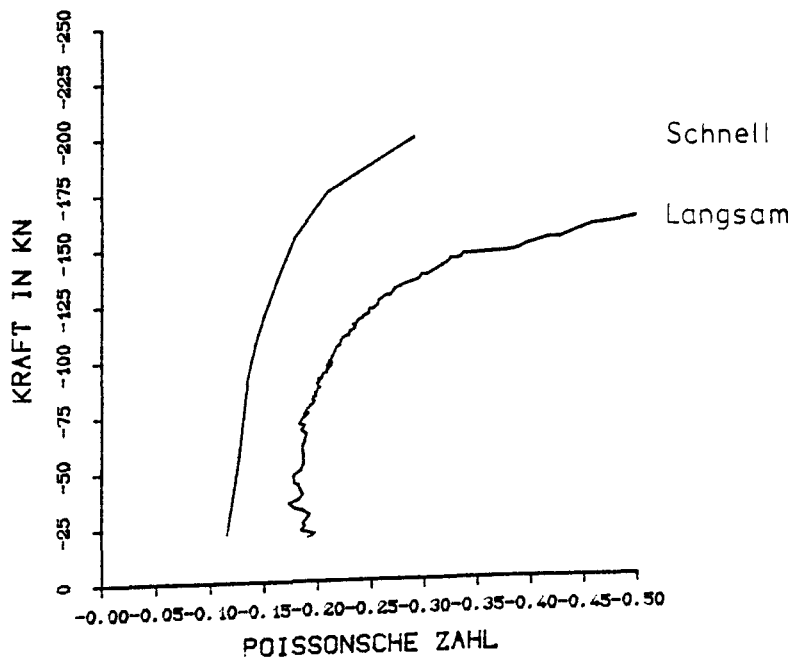
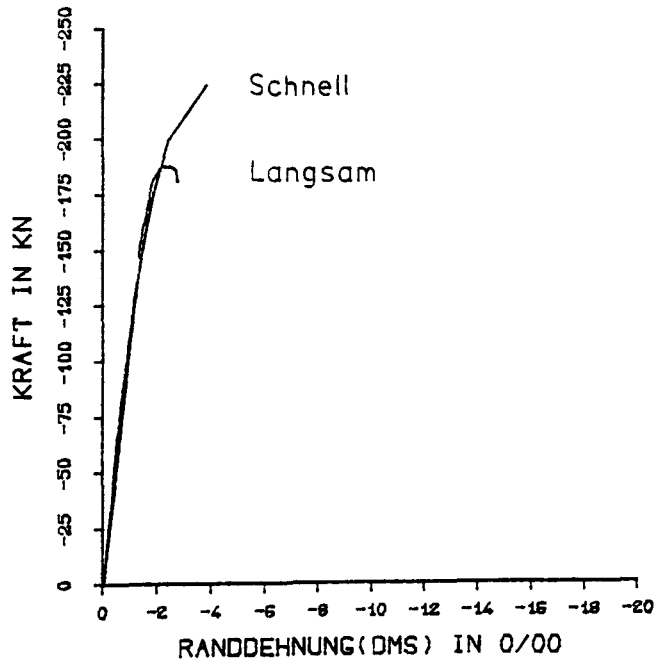
Randdehnung ausmittig belasteter Betonprismen aus Messungen mit Dehnungsmeßstreifen (DMS) und aus Messungen mit den Weggebern (WG) in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B I:

Glatte Fasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

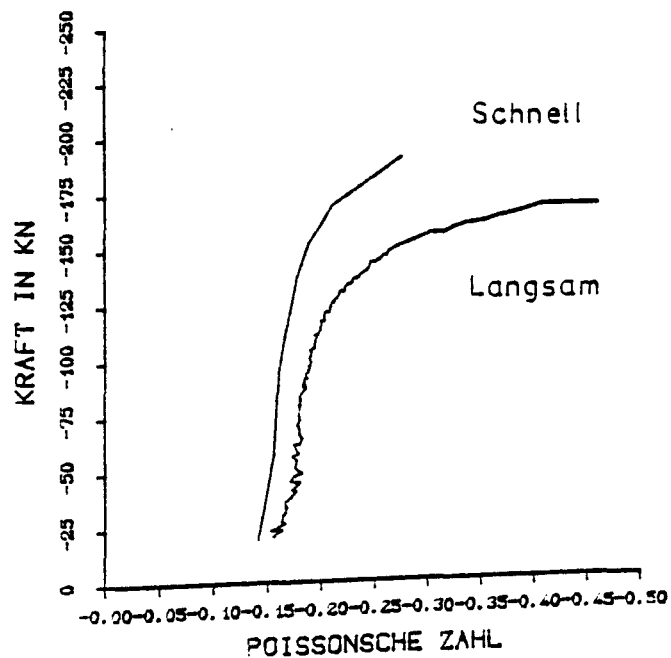
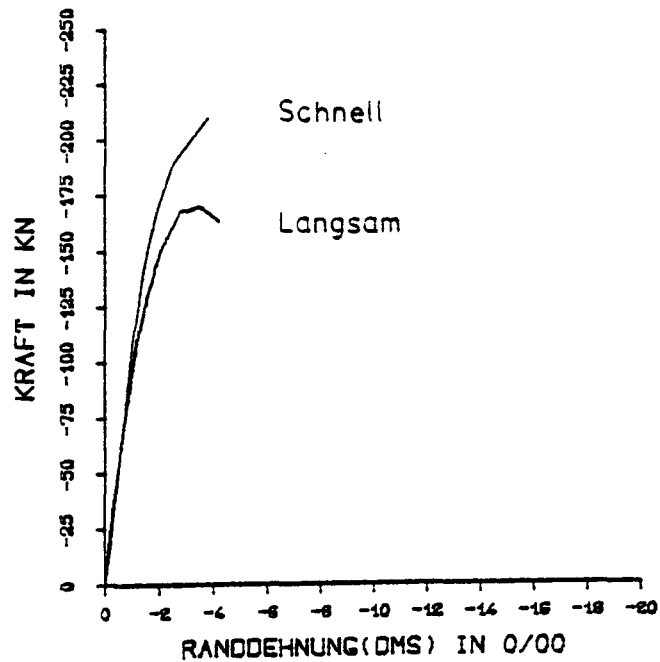
Randdehnung und Poisson'sche Zahl eines schnell und eines langsam exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

SERIE B I:

Glatte Fasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

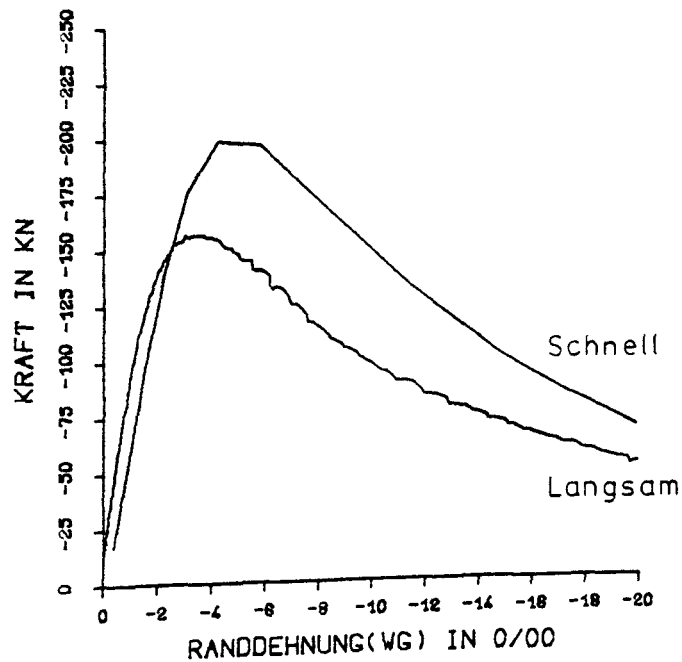
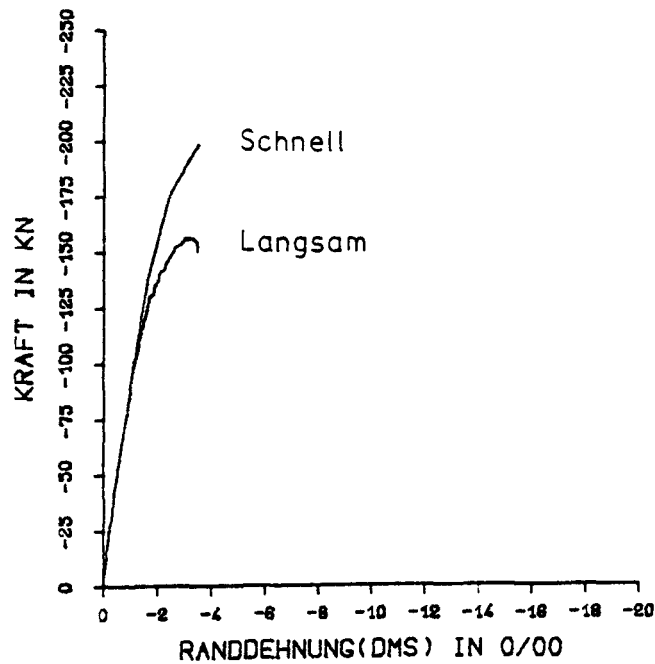
Randdehnung und Poisson'sche Zahl eines schnell und eines langsam exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

# SERIE B I: Ohne Fasern



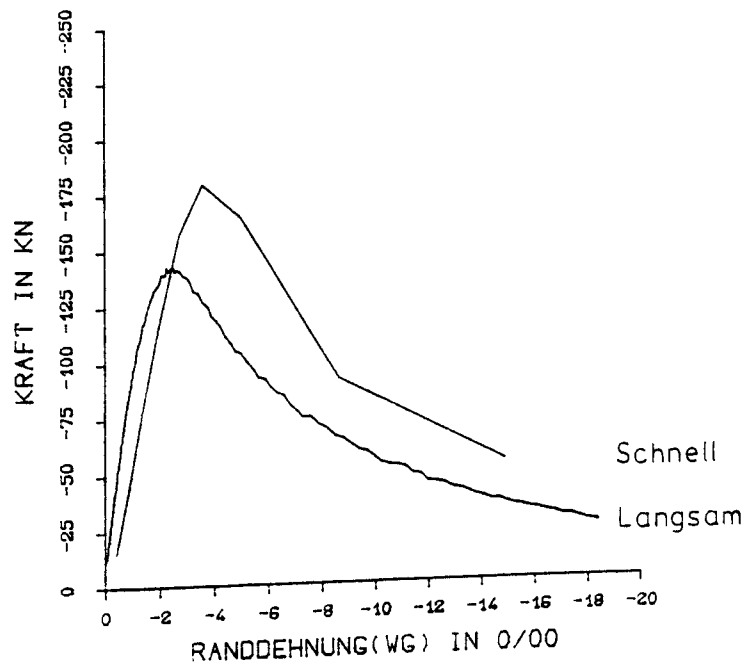
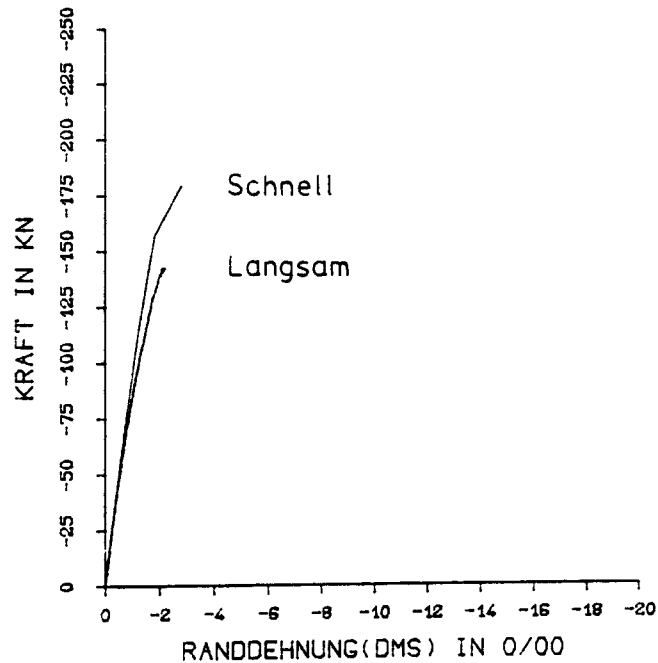
Randdehnung und Poisson'sche Zahl eines schnell und eines langsam exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

## SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Randdehnung aus DMS- und aus Weggeber-Messungen eines schnell und eines langsam exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

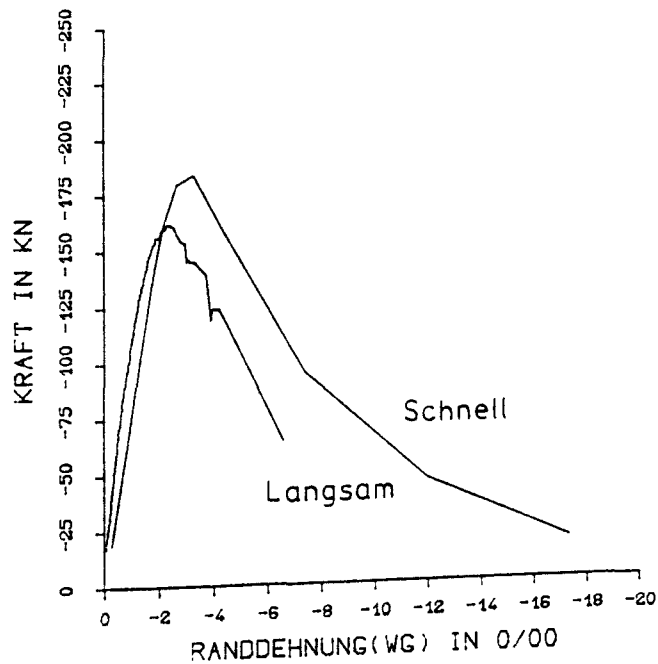
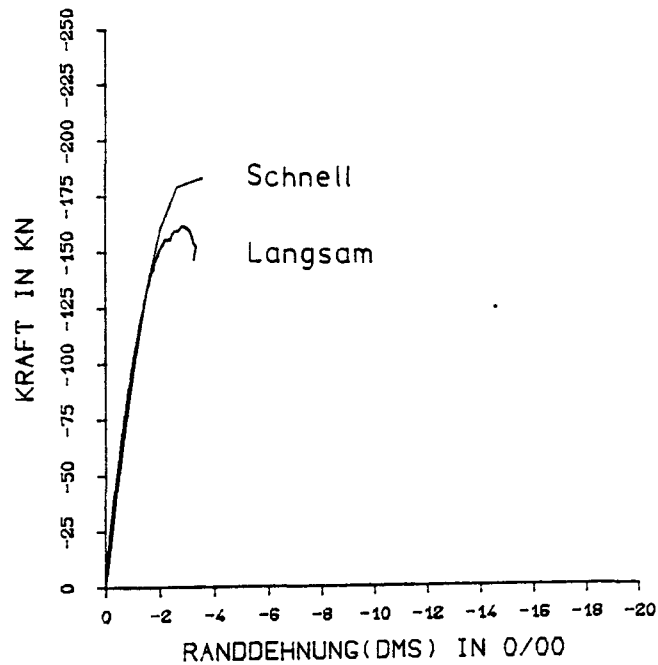
## SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Randdehnung aus DMS- und aus Weggeber-Messungen eines schnell und eines langsam exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

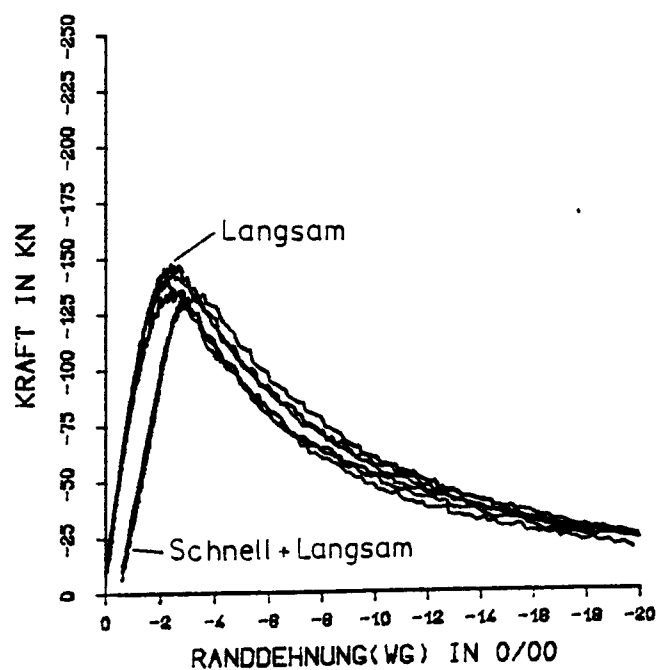
## SERIE B II :

### Ohne Fasern



Randdehnung aus DMS- und aus Weggeber-Messungen eines schnell und eines langsam exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

SERIE B II :

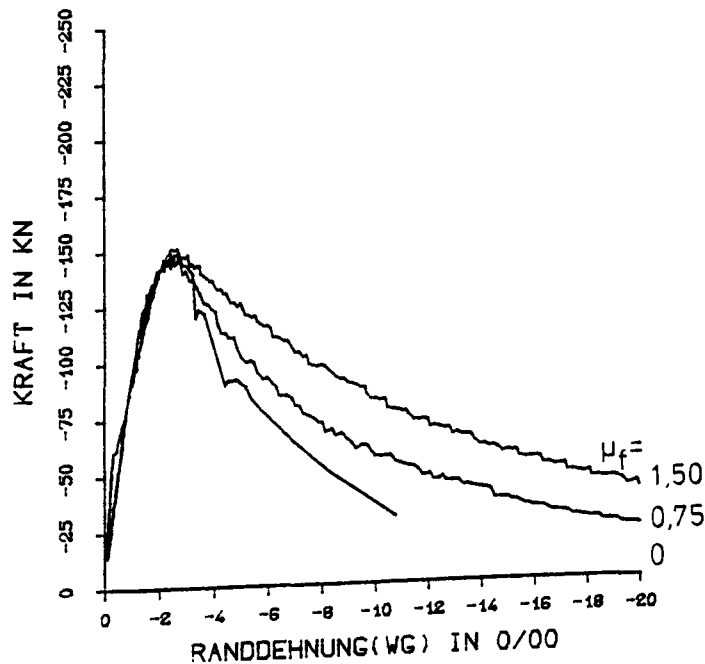
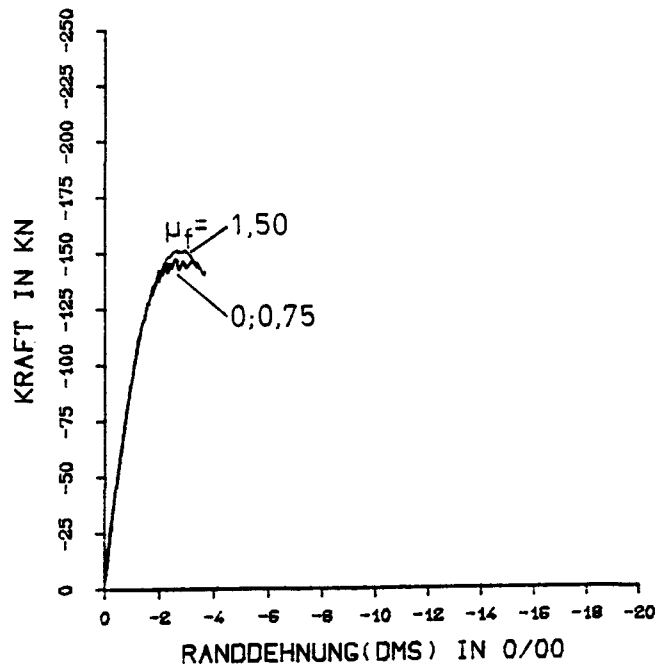
Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Randdehnung langsam exzentrisch gedrückter Betonprismen mit und ohne schneller Vorlast in Abhängigkeit von der Beanspruchung; Darstellung sämtlicher Einzelversuche der Versuchsreihen



# SERIE B II : Hakenfasern

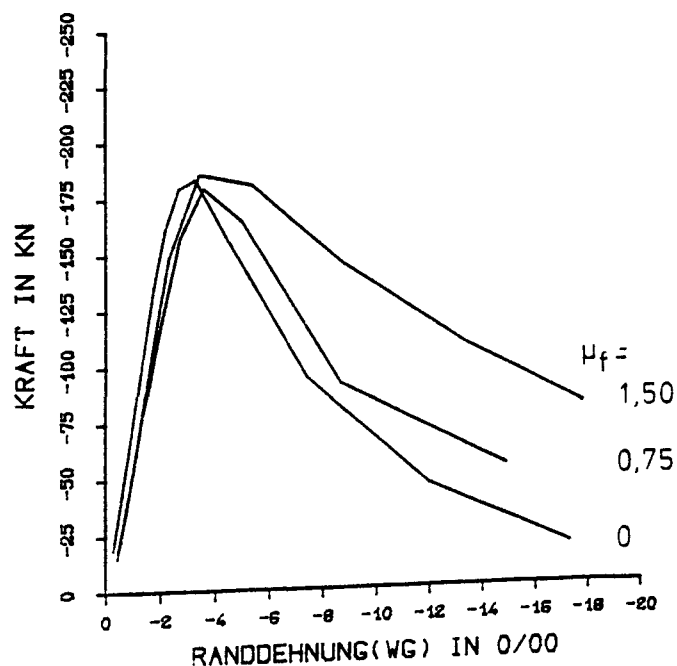
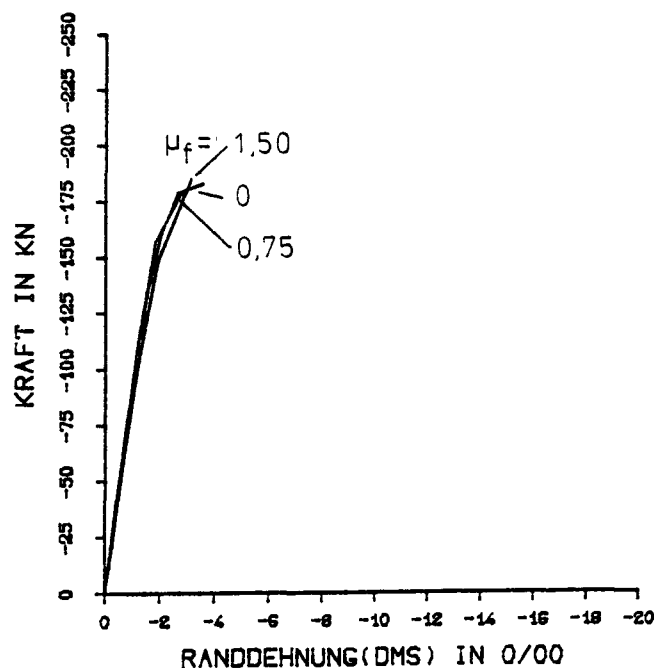
Langsame Versuche



Randdehnung aus DMS- und aus Weggeber-Messungen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für langsam exzentrisch gedrückte Betonprismen mit unterschiedlichem Fasergehalt

# SERIE B II : Hakenfasern

Schnelle Versuche

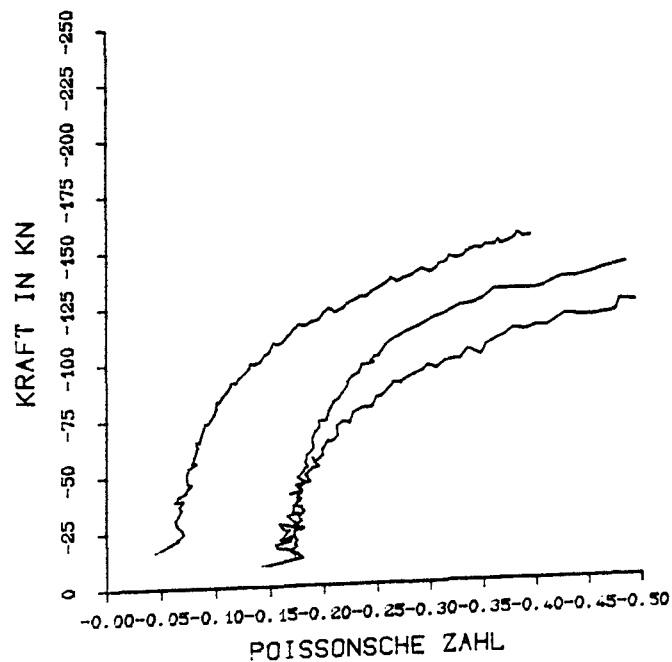
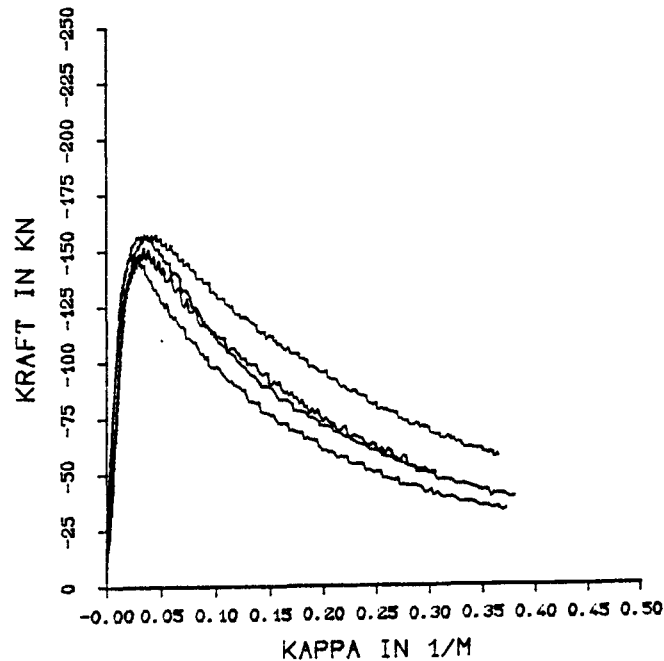


Randdehnung aus DMS- und aus Weggeber-Messungen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für schnell exzentrisch gedrückte Betonprismen mit unterschiedlichem Fasergehalt

SERIE B II:

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Langsame Versuche



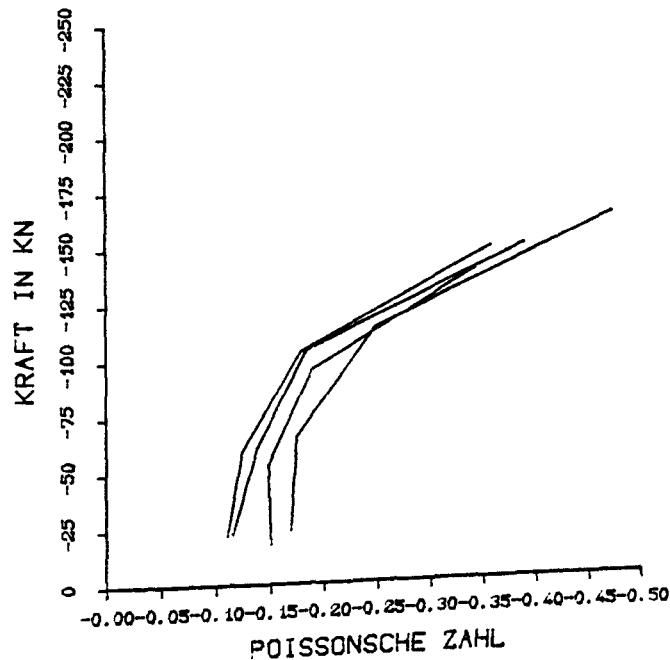
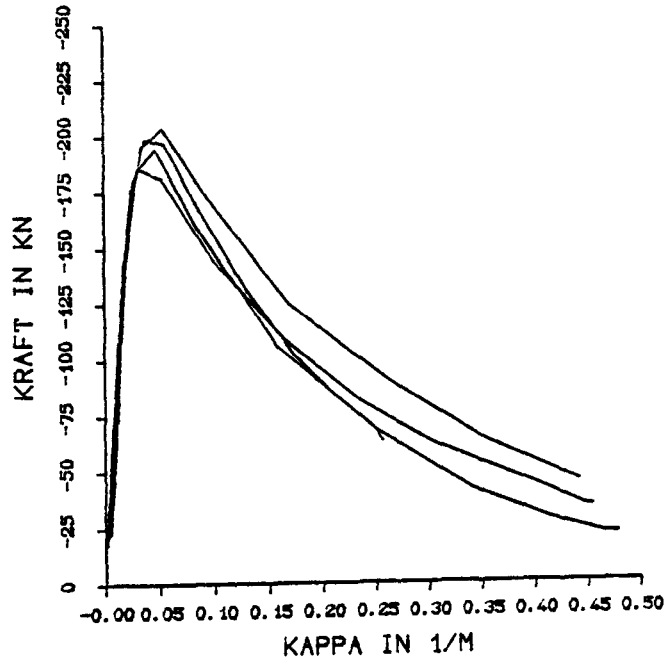
Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II:

Hakenfasern

 $\mu_f = 1,50\%$ 

Schnelle Versuche



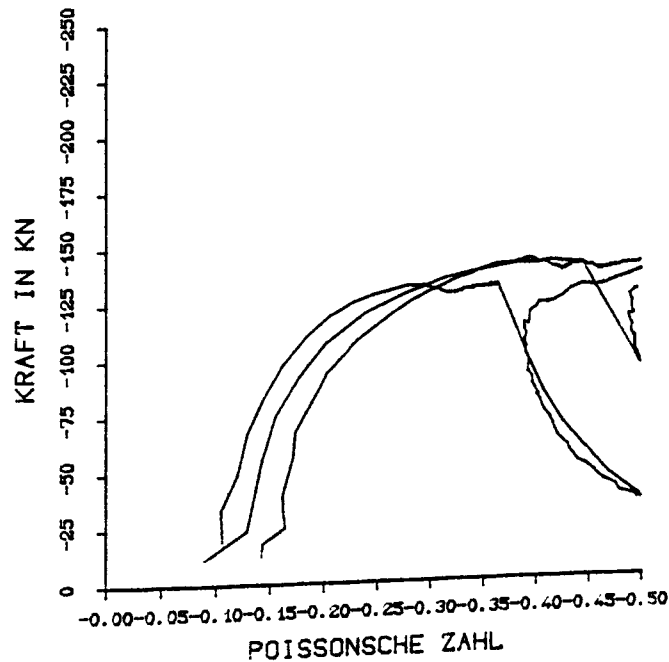
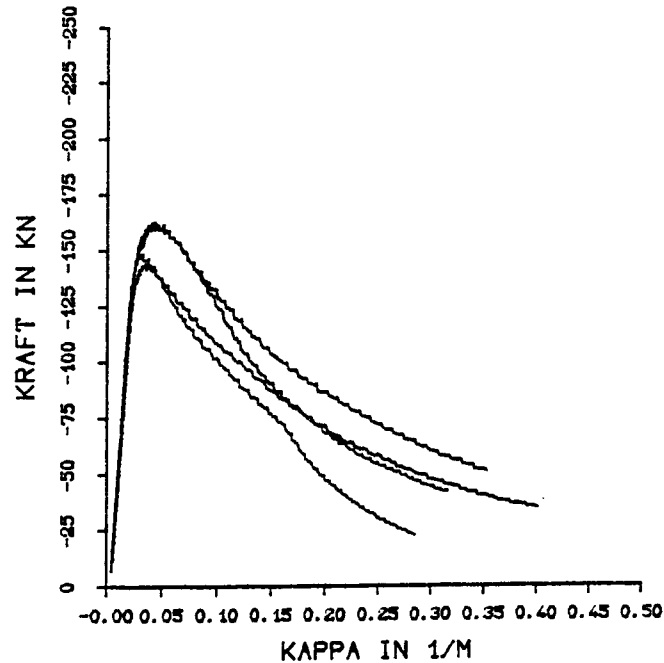
Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Langsame Versuche

nach schneller Vorlast

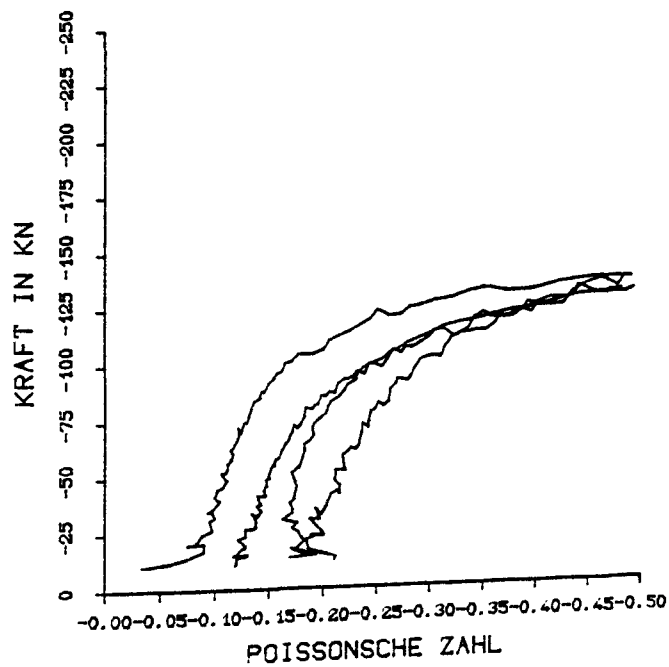
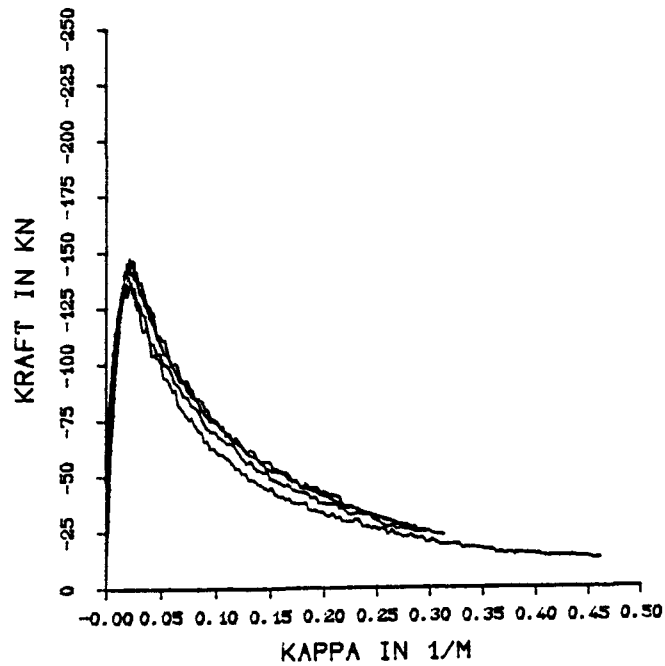


Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl ausmittig  
belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Bean-  
spruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Langsame Versuche

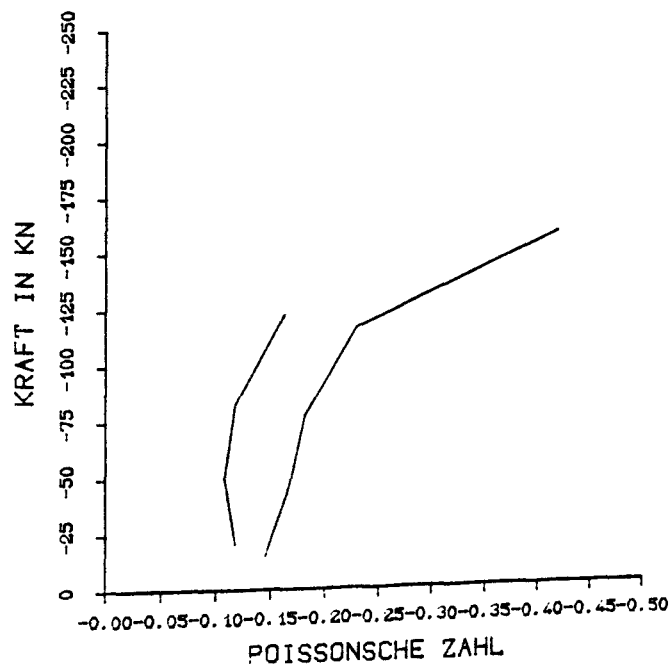
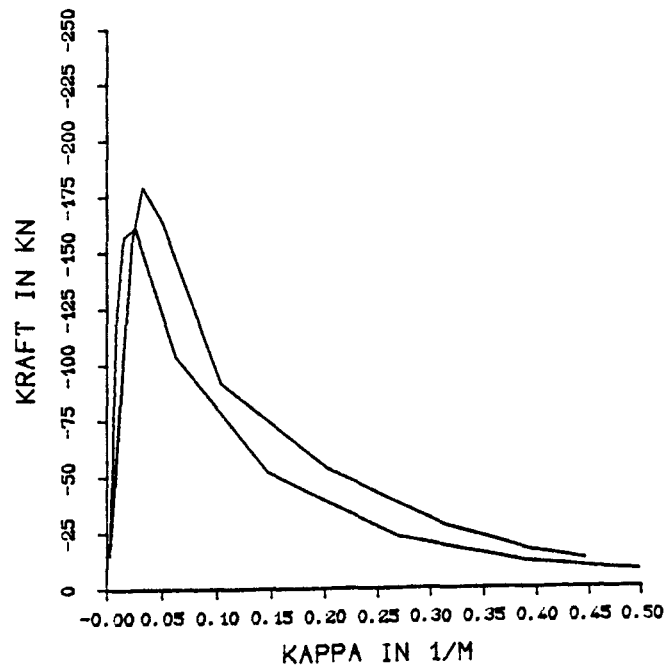


Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Schnelle Versuche



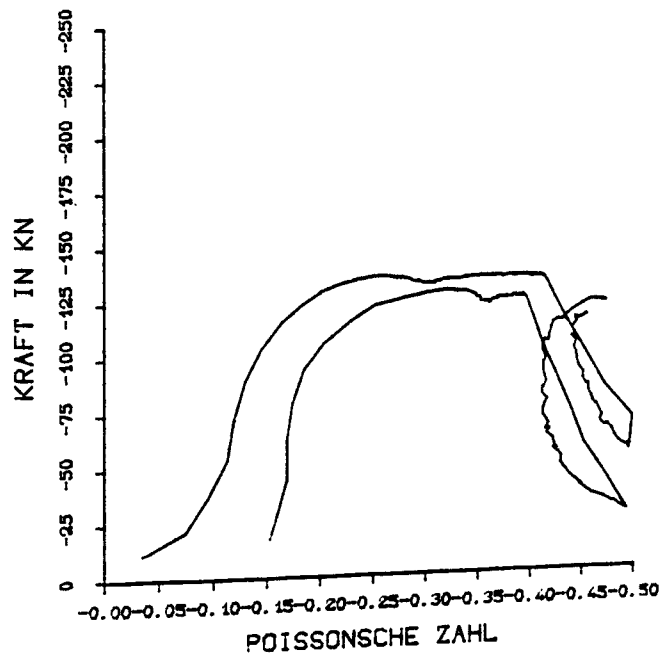
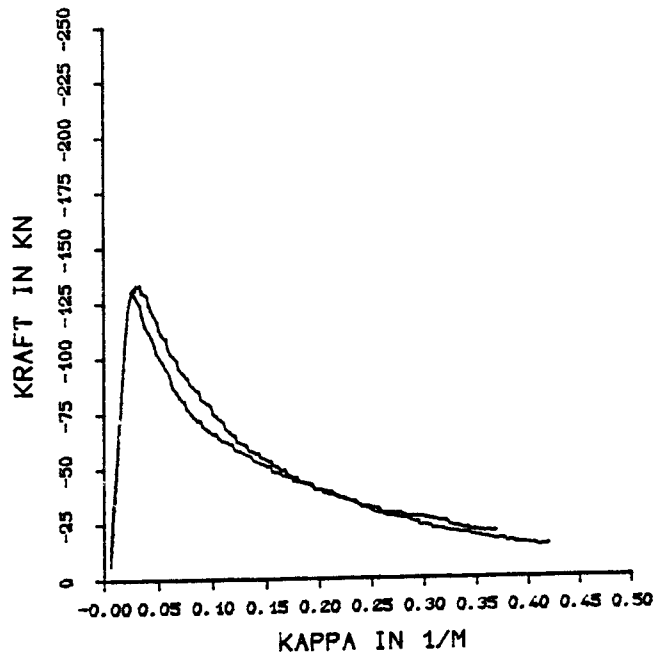
Querschnittschrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl ausmittig  
belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Bean-  
spruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Langsame Versuche

nach schneller Vorlast

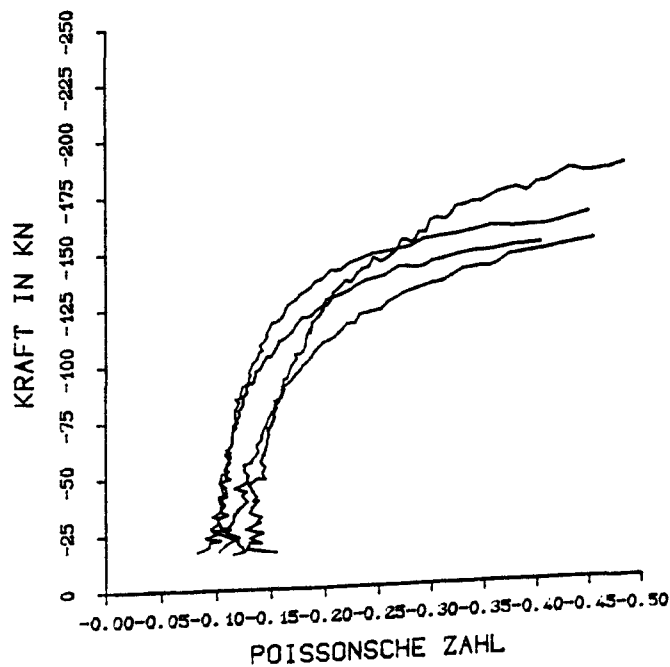
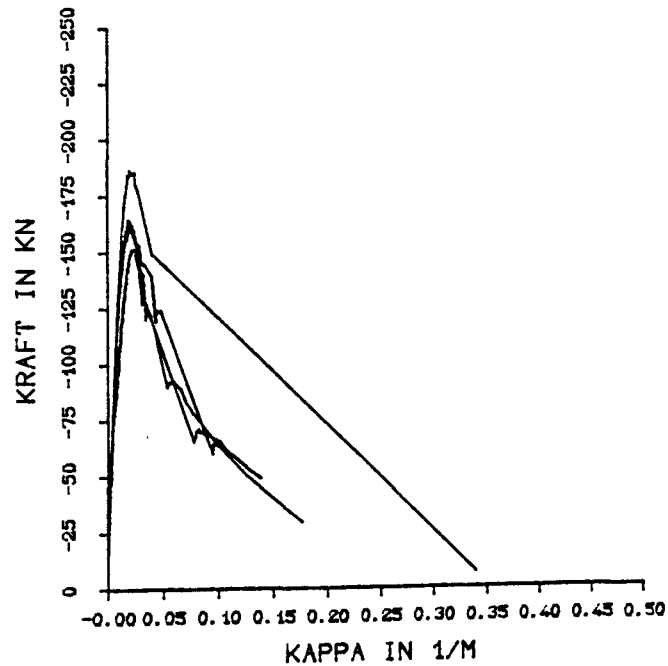


Querschnittschrümmung  $\alpha$  und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe



SERIE B II :  
Ohne Fasern

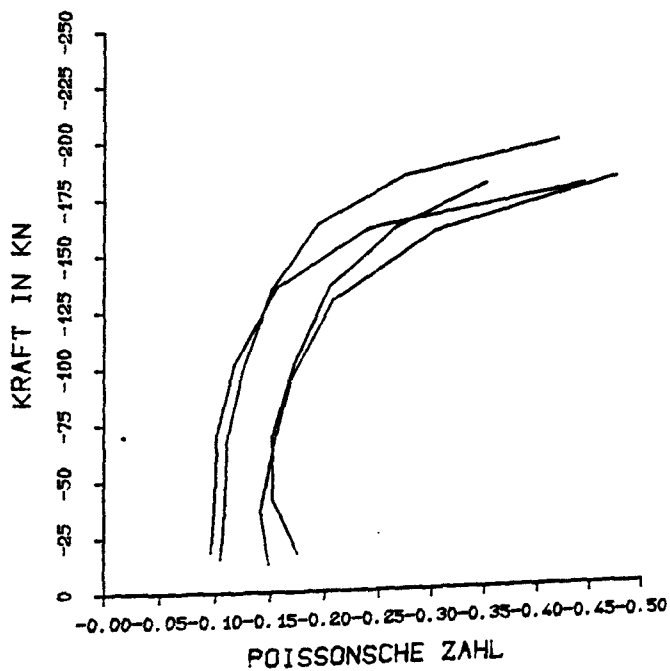
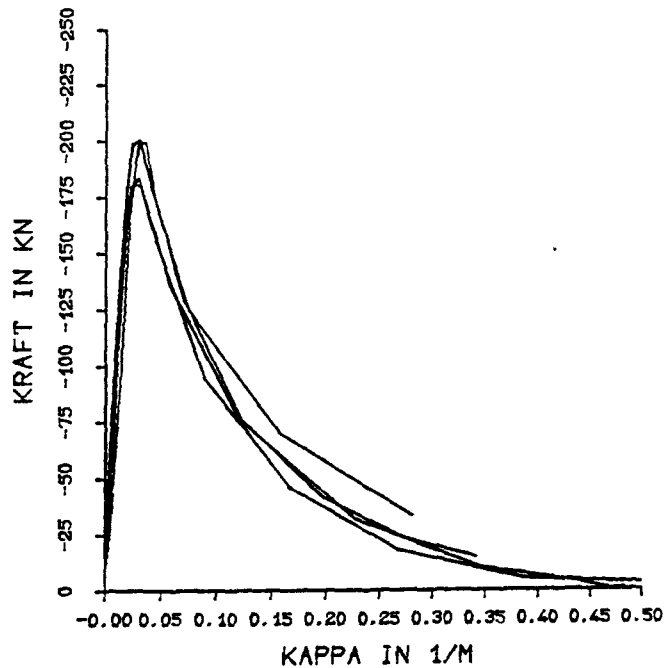
Langsame Versuche



Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl ausmittig  
belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Bean-  
spruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

SERIE B II :  
Ohne Fasern

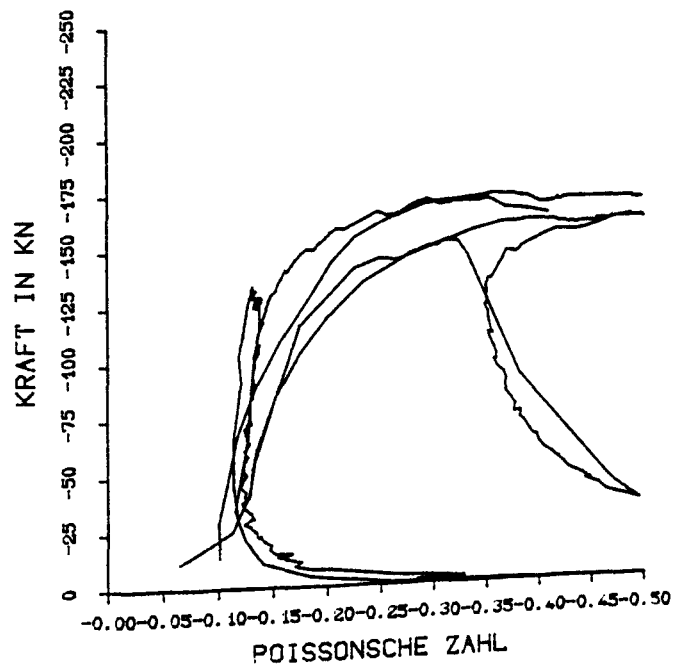
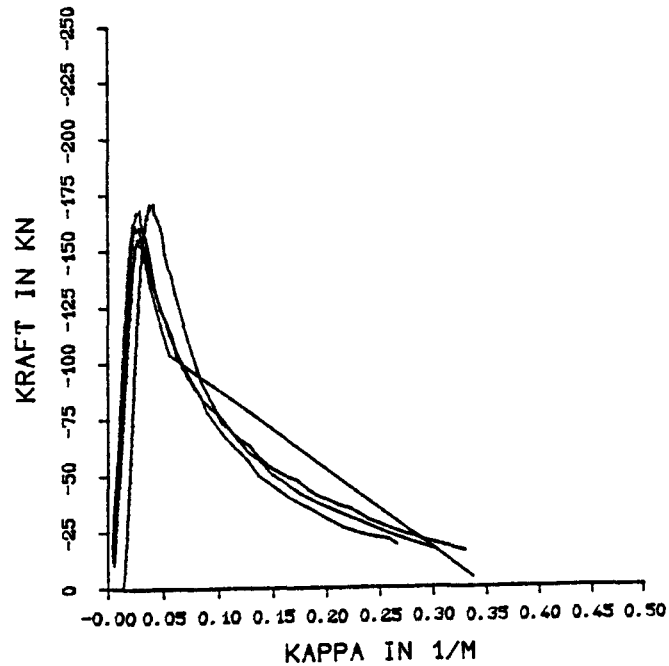
Schnelle Versuche



Querschnittschrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl ausmittig belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Beanspruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

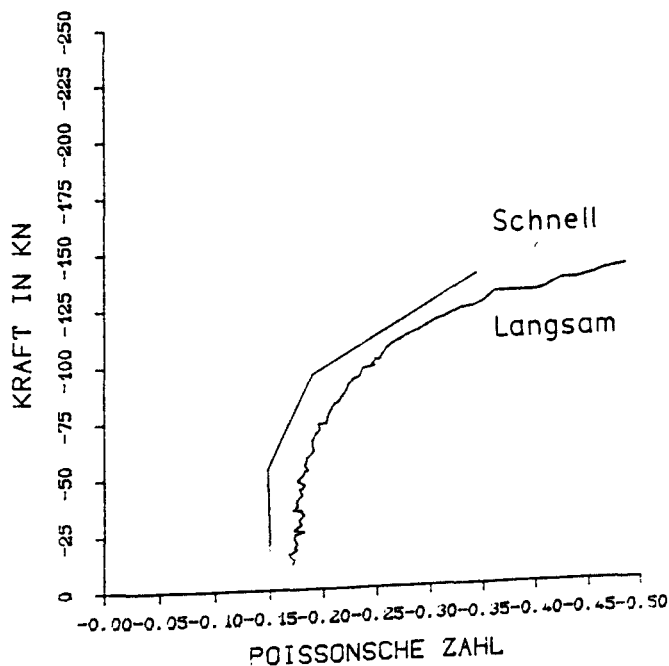
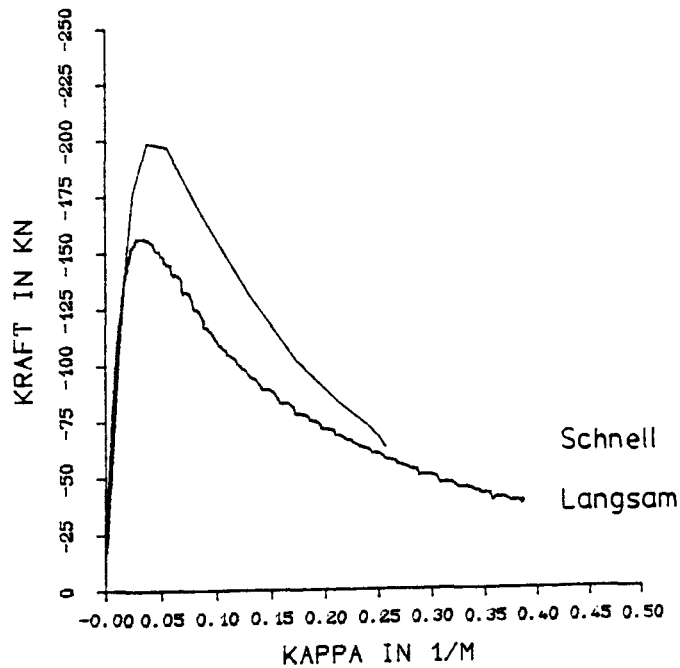
SERIE B II :  
Ohne Fasern

Langsame Versuche  
nach schneller Vorlast



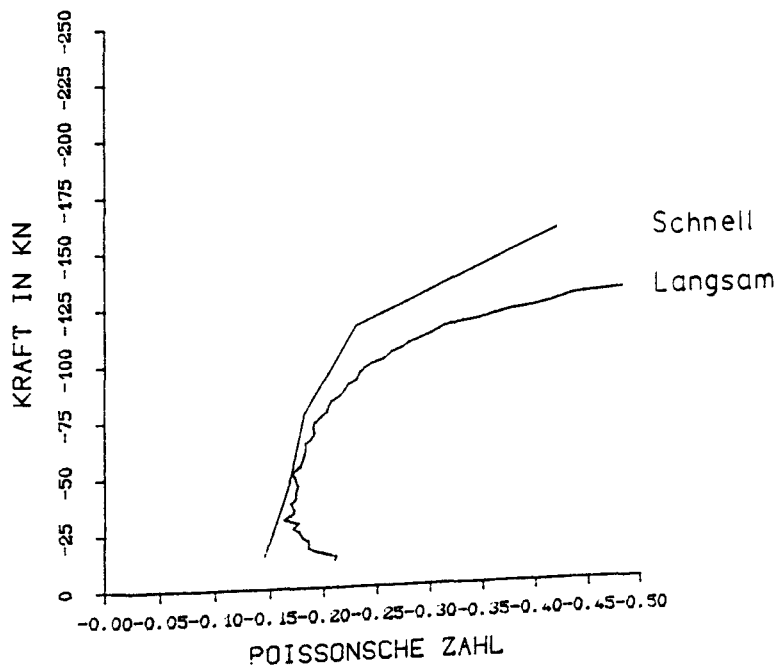
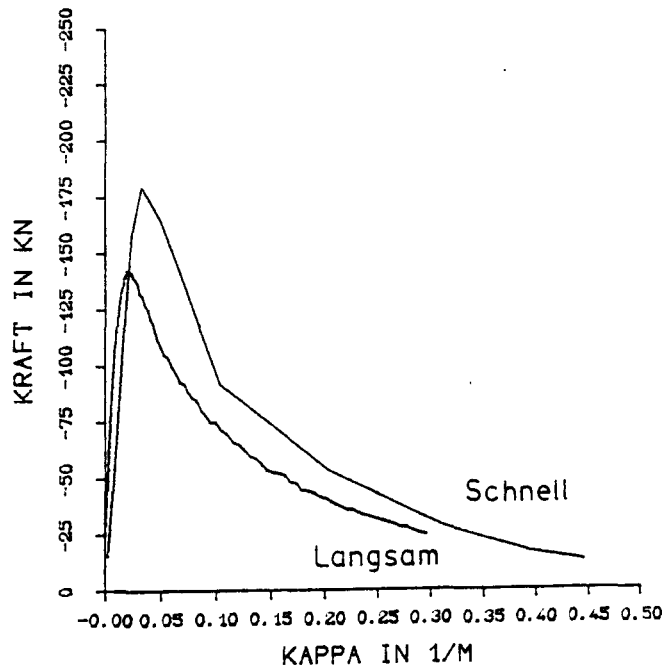
Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl ausmittig  
belasteter Betonprismen in Abhängigkeit von der Bean-  
spruchung für sämtliche Einzelversuche der Versuchsreihe

## SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

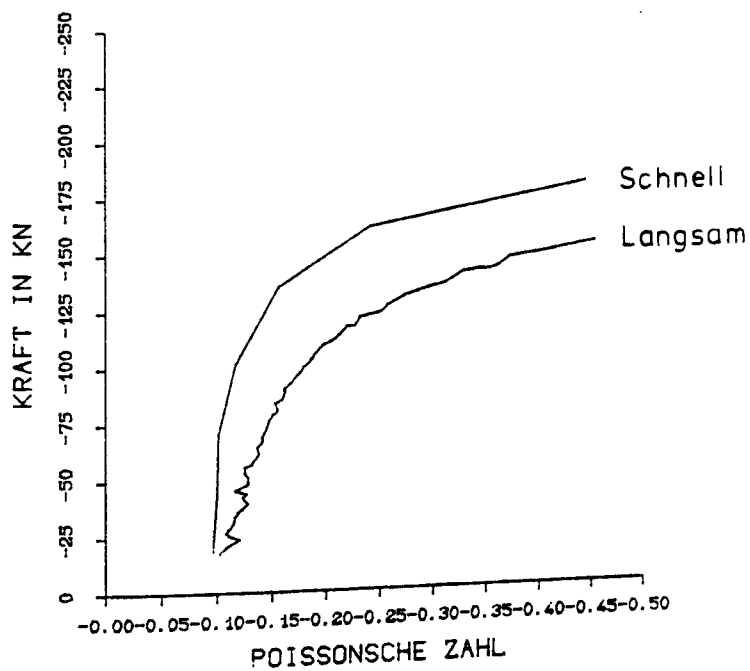
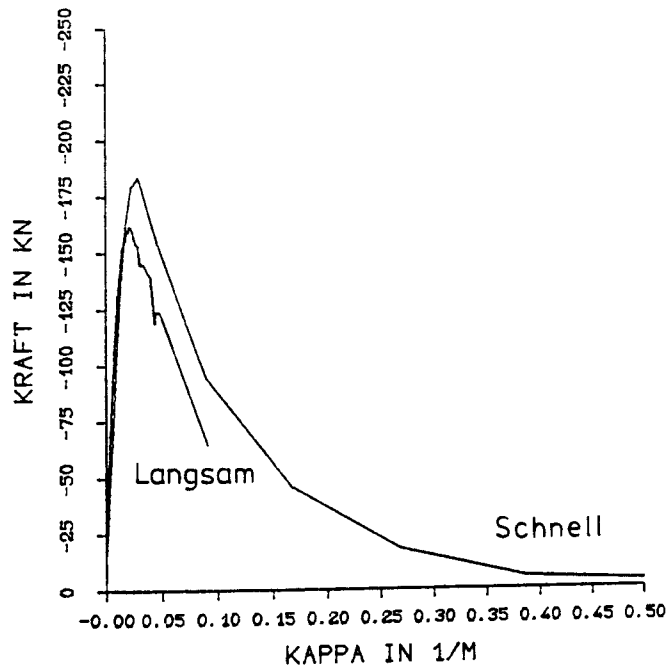
Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl eines langsam und eines schnell exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

## SERIE B II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl eines langsam und eines schnell exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

# SERIE B II : Ohne Fasern



Querschnittskrümmung  $\kappa$  und Poisson'sche Zahl eines langsam und eines schnell exzentrisch gedrückten Betons in Abhängigkeit von der Beanspruchung

Betonzusammensetzung je m<sup>3</sup> Frischbeton

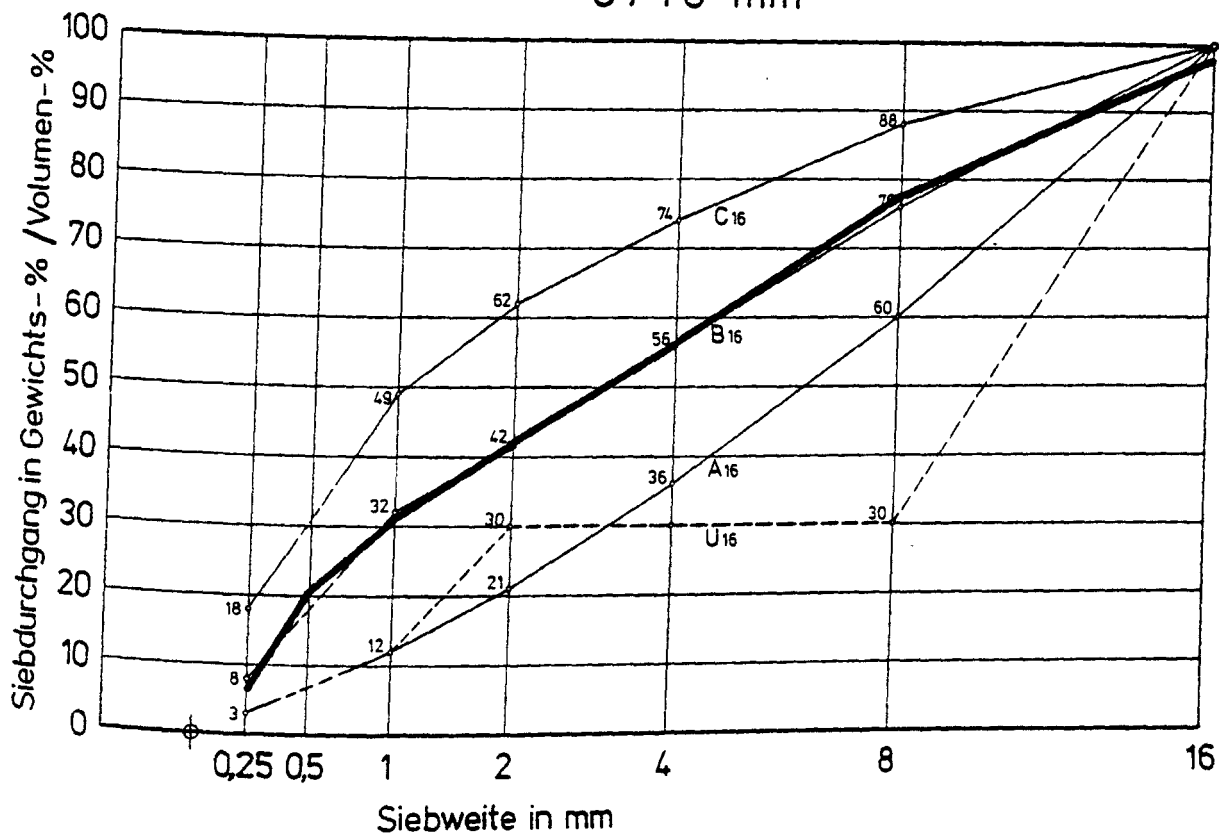
Zement:	PZ 35 F	313,0 kg
Wasser:		182,3 kg
Zuschlag:	O/1 : 10 %	1.823,0 kg
	O/2 : 30 %	
	2/8 : 30 %	
	8/16 : 30 %	

Stahlfasern:	glatte Fasern: Wirex 0,4/25	(C I)
	Hakenfasern: Dramix ZP 30/.50	(C II)
	$\mu_f = 1,50 \text{ Vol.-%}$	9,4 kg
	$\mu_f = 0,75 \text{ Vol.-%}$	4,7 kg

Betonverflüssiger: Wörmann BV

Zugabemenge nach Augenschein, bis fließfähiger Beton erreicht wurde

0/16 mm



Faserart	Fasergehalt (Vol.-%)	Rohdichte (kg/m <sup>3</sup> )	mittl. Würfel- druck- festigkeit (N/mm <sup>2</sup> )	mittl. Spalt- zugfestigkeit (N/mm <sup>2</sup> )
Serie C I: glatte Fasern	1,50	2,37	45,7	4,55
	0,75	2,34	46,8	3,45
	0	2,30	43,4	3,47
Serie C II: Hakenfasern	1,50	2,37	52,4	4,69
	0,75	2,32	48,5	3,55
	0	2,30	46,7	3,47

An Begleitproben ermittelte Rohdichten, Druckfestigkeiten und Spaltzugfestigkeiten der Versuchsbetone



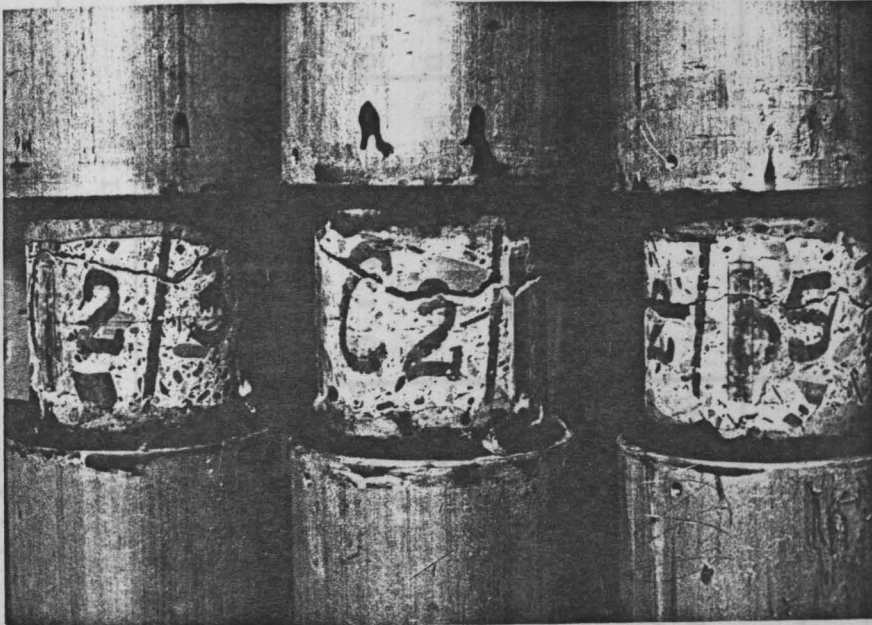


Bild 1:

gerissene Zugproben eine Versuchsreihe (schnelle Versuche,  $\mu_f = 0$ )

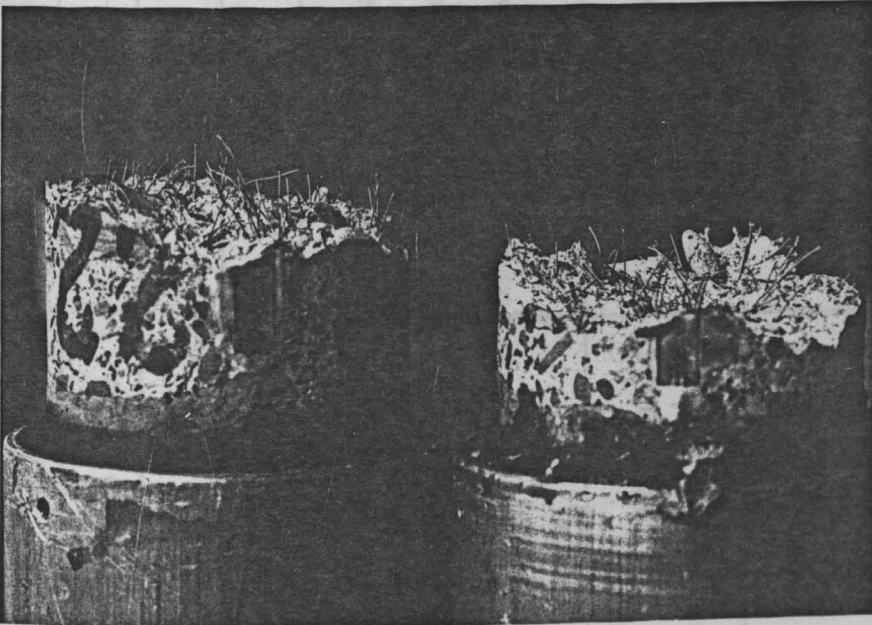


Bild 2:

Bruchflächen eines Faserbetons (schneller Versuch,  $\mu_f \approx 1,50 \%$ )

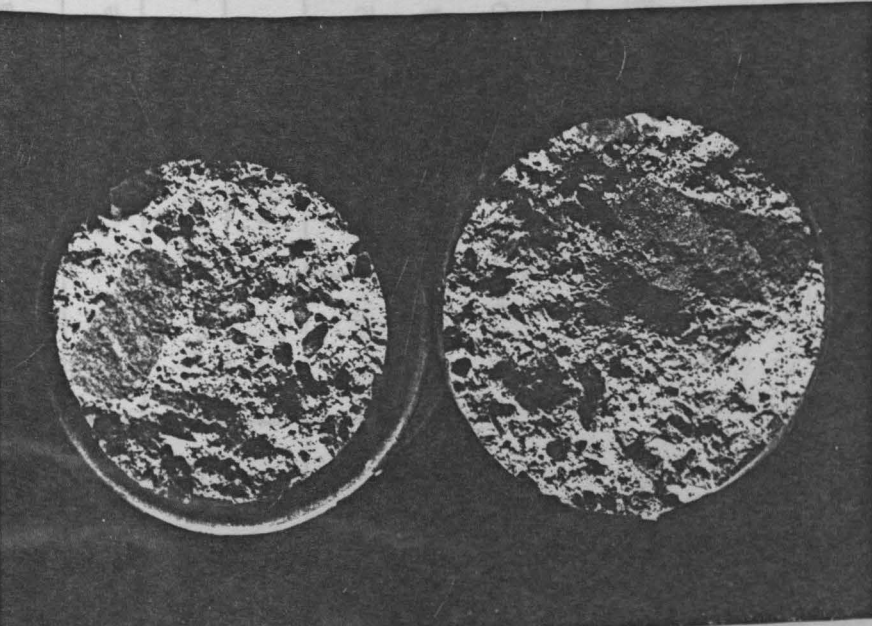


Bild 3:

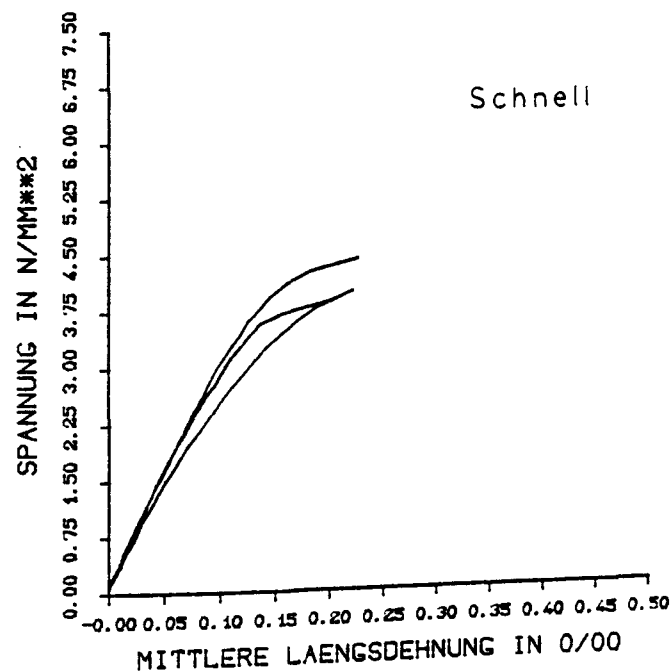
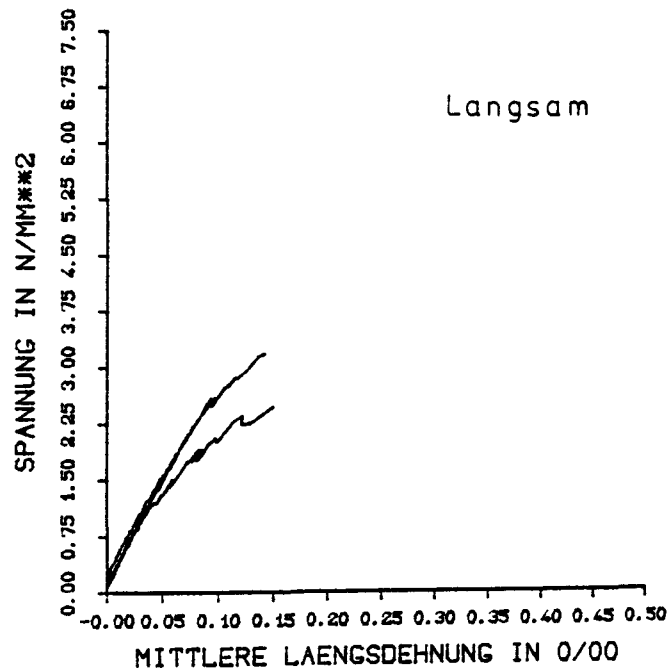
Bruchflächen eines Normalbetons (langsamer Versuch)

Zentrische Zugfestigkeit  $\beta_z$  [N/mm<sup>2</sup>] und Bruchdehnung  $\epsilon_u$  (%)

Belastungsart	glatte Fasern (Serie C I)						Hakenfasern (Serie C II)					
	$\mu_f = 1,50 \%$		$\mu_f = 0,75 \%$		$\mu_f = 0 \%$		$\mu_f = 1,50 \%$		$\mu_f = 0,75 \%$		$\mu_f = 0 \%$	
	$\beta_z$	$\epsilon_u$	$\beta_z$	$\epsilon_u$	$\beta_z$	$\epsilon_u$	$\beta_z$	$\epsilon_u$	$\beta_z$	$\epsilon_u$	$\beta_z$	$\epsilon_u$
langsam	2,86	0,115	3,42	0,110	3,85	0,154	2,92	0,185	2,84	0,131	2,94	0,230
	2,49	0,150	4,01	0,136	3,00	0,096	3,06	0,207	3,30	0,132	2,45	0,148
	3,20	0,142	3,00	0,105	3,51	0,140	2,69	0,176	3,12	0,207	2,94	0,116
Mittel	2,85	0,136	3,48	0,117	3,46	0,130	2,89	0,189	3,09	0,157	2,78	0,165
	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)	(100 %)
schnell	4,44	0,227	5,11	0,225	5,11	0,198	3,28	0,151	4,28	0,266	3,00	0,192
	4,03	0,221	3,55	0,165	3,95	0,133	3,34	0,260	3,09	0,265	2,92	0,189
	3,89	0,204	4,42	0,188	3,95	0,237	3,48	0,184	3,40	0,155	2,21	0,200
Mittel	4,12	0,217	4,36	0,193	4,34	0,186	3,36	0,198	3,88	0,229	2,71	0,194
	(144,6%)	(159,6%)	(125,6%)	(165,0 %)	(125,6%)	(163,1%)	(116,4%)	(104,8%)	(125,9%)	(145,9 %)	(97,6%)	(117,6%)

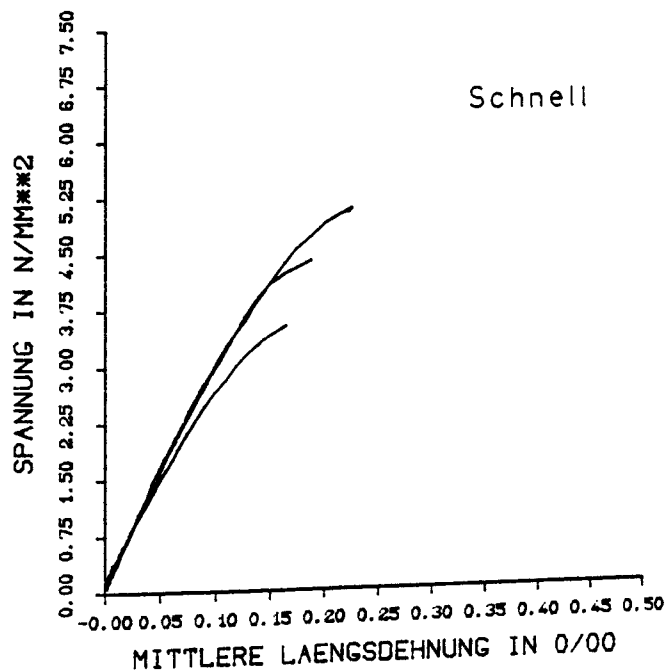
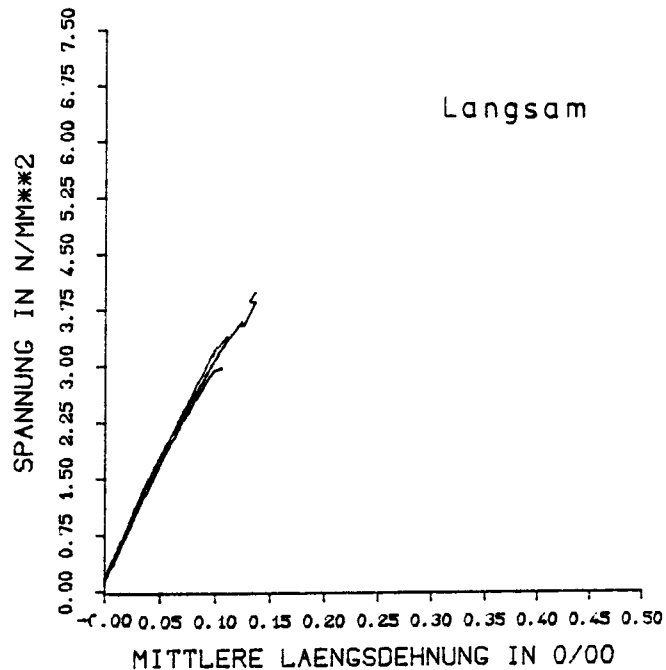
Zusammenstellung der zentrischen Zugfestigkeiten und der Bruchdehnungen aus sämtlichen Einzelversuchen, sowie der Mittelwerte der einzelnen Versuchsreihen

SERIE CI:

Glatte Fasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

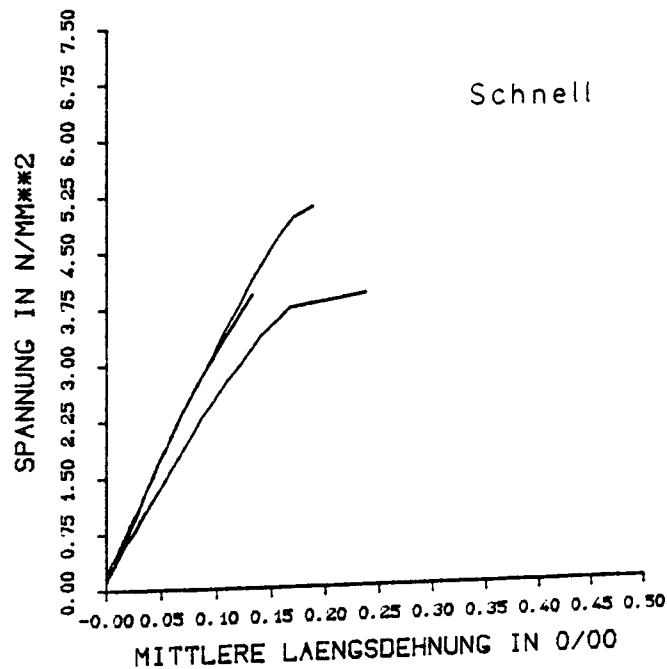
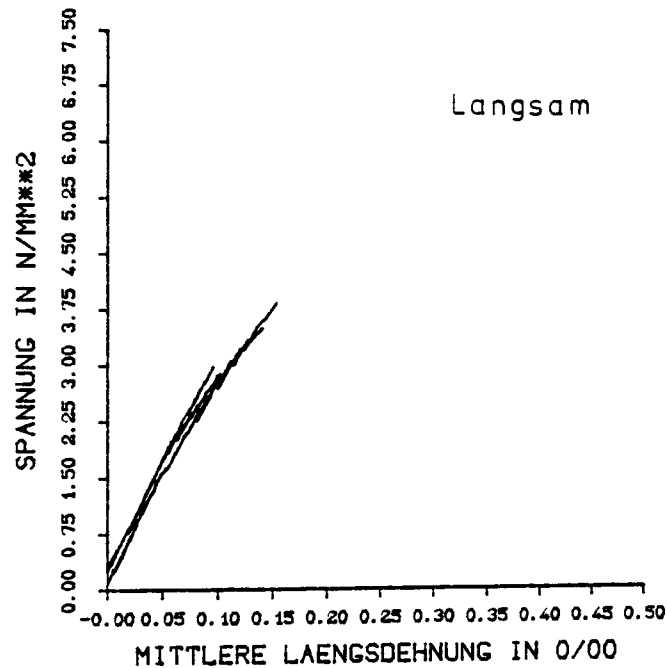
Spannungs-Dehnungslinien zentrisch gezogener Betone bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe

SERIE CI:

Glatte Fasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

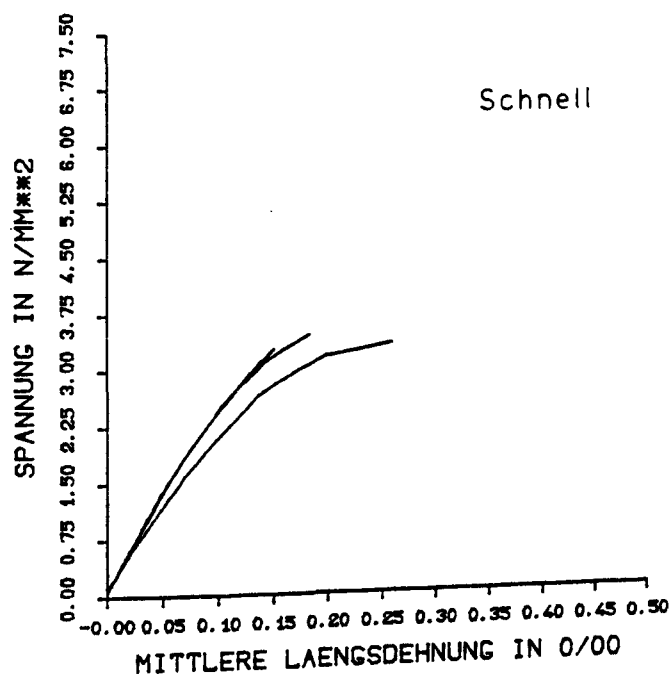
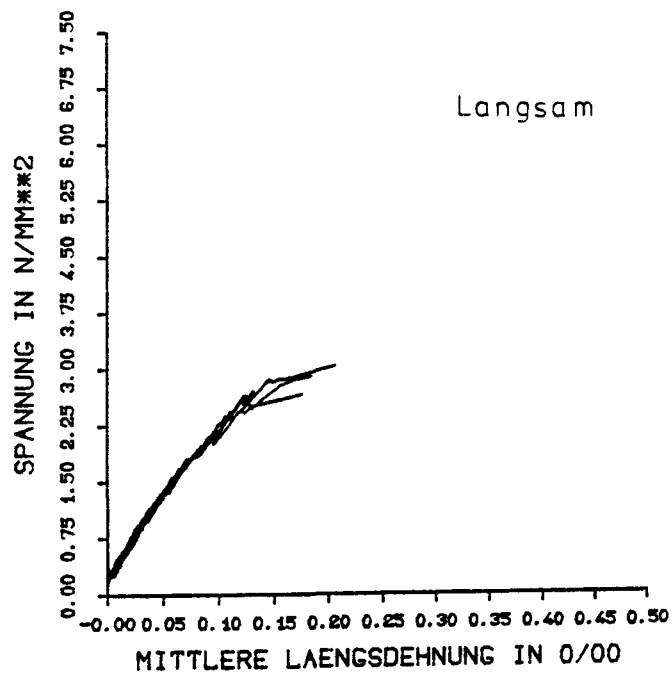
Spannungs-Dehnungslinien zentrisch gezogener Betone bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe

# SERIE CI: Ohne Fasern



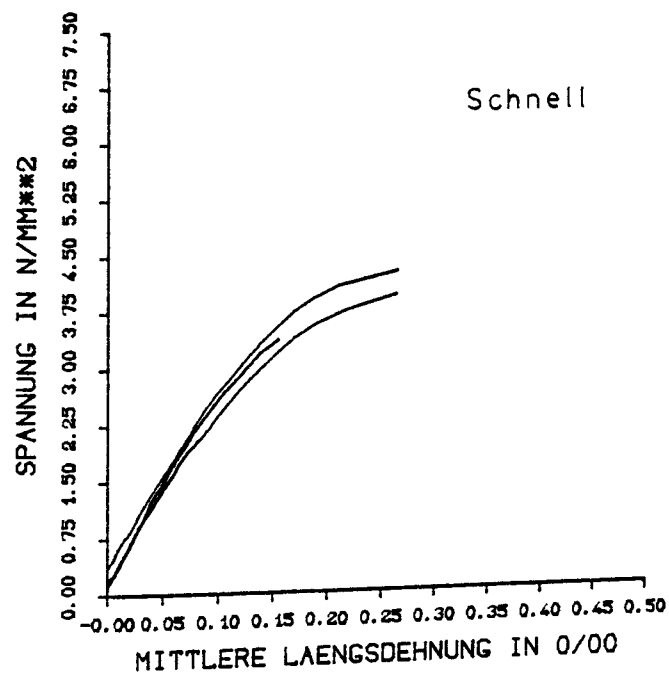
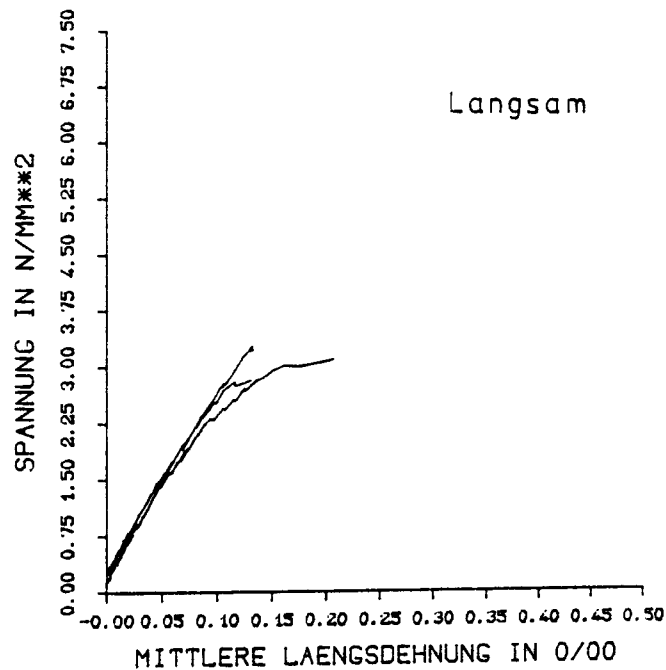
Spannungs-Dehnungslinien zentrisch gezogener Betone bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe

SERIE C II:

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Spannungs-Dehnungslinien zentrisch gezogener Betone bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe

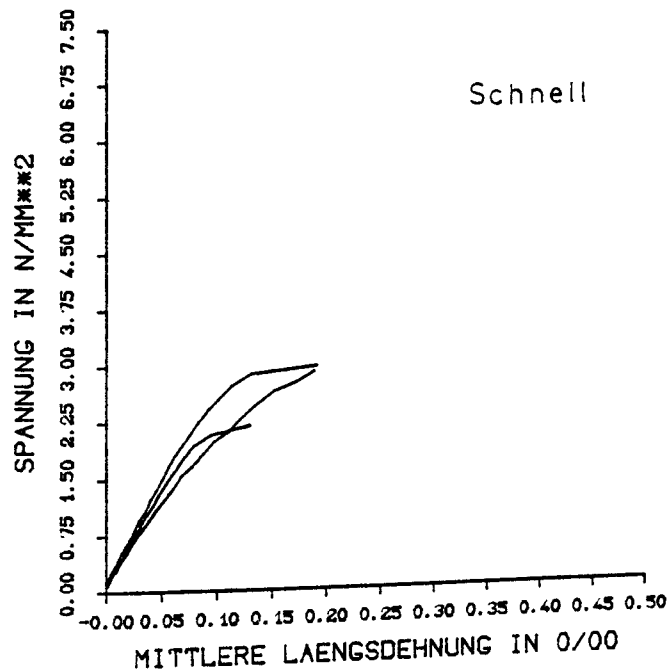
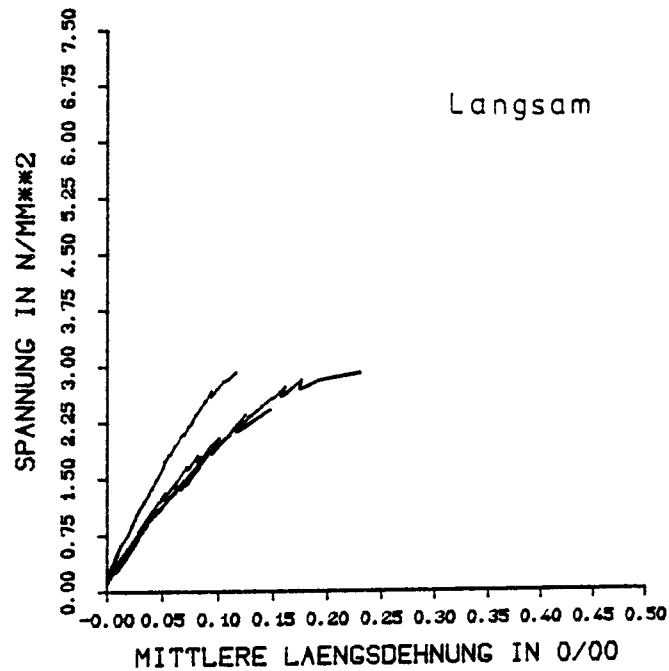
## SERIE C II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Spannungs-Dehnungslinien zentrisch gezogener Betone bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe

# SERIE C II :

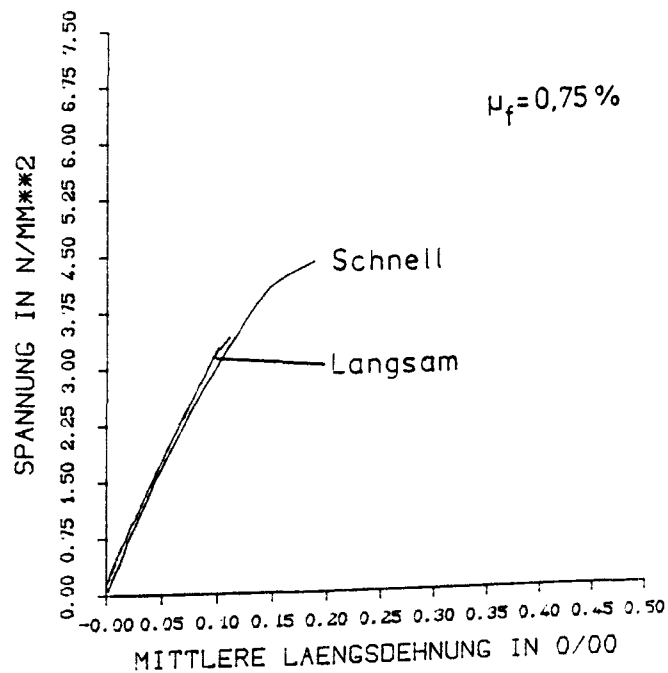
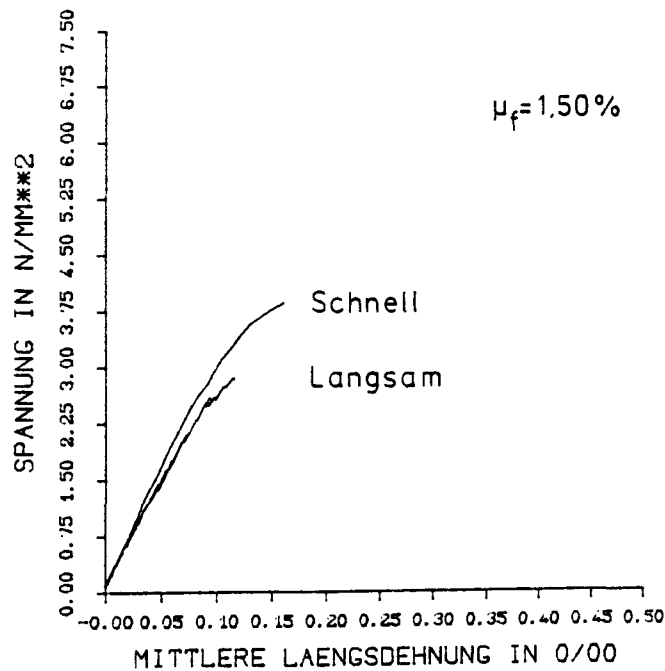
## Ohne Fasern



Spannungs-Dehnungslinien zentrisch gezogener Betone bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe



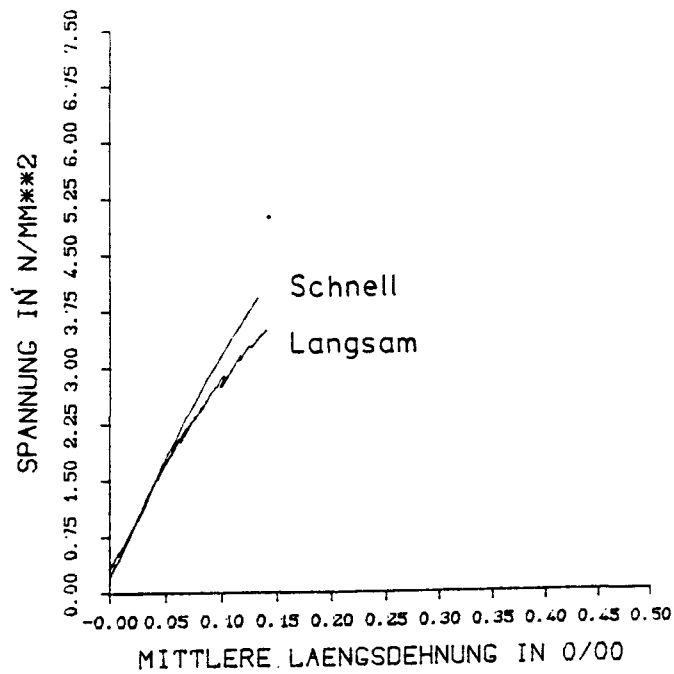
# SERIE CI: Glatte Fasern



Spannungs-Dehnungslinien eines schnell und eines langsam zentrisch gezogenen Betons für zwei unterschiedliche Fasergehalte

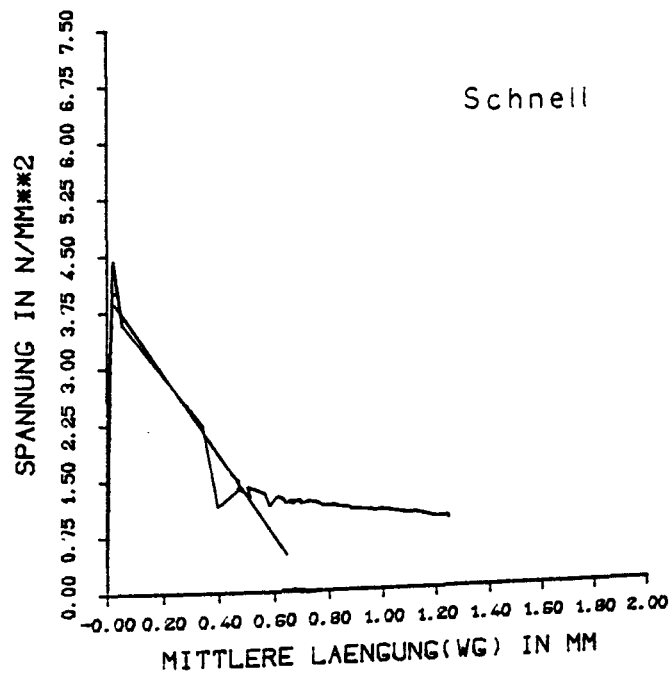
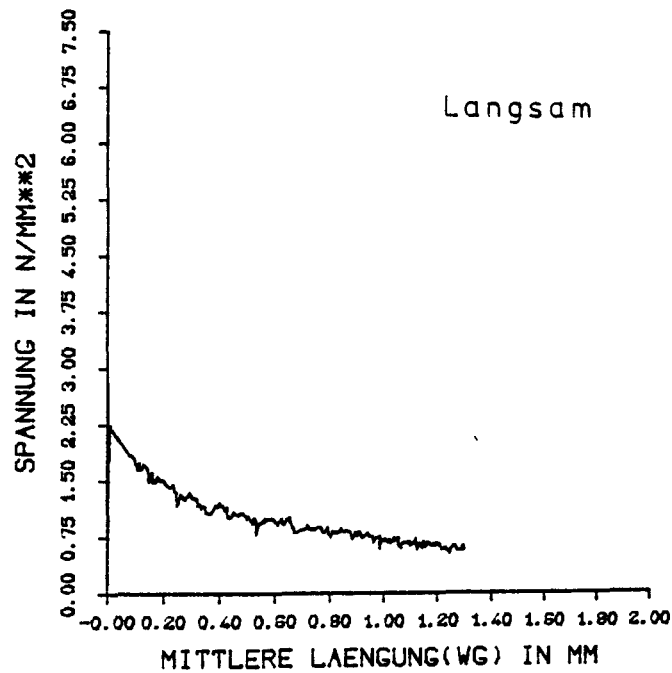
# SERIE CI:

## Ohne Fasern



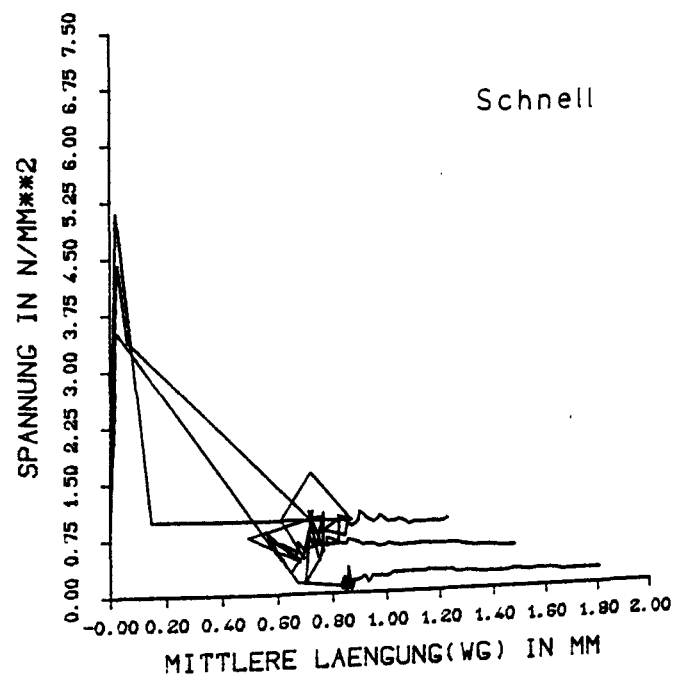
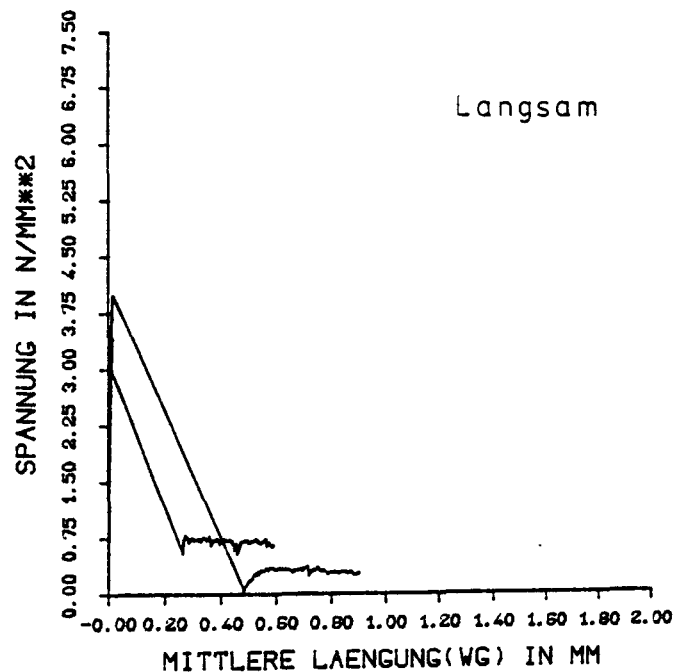
Spannungs-Dehnungslinie eines schnell und eines langsam zentrisch gezogenen Betons ohne Fasern

SERIE CI:

Glatte Fasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

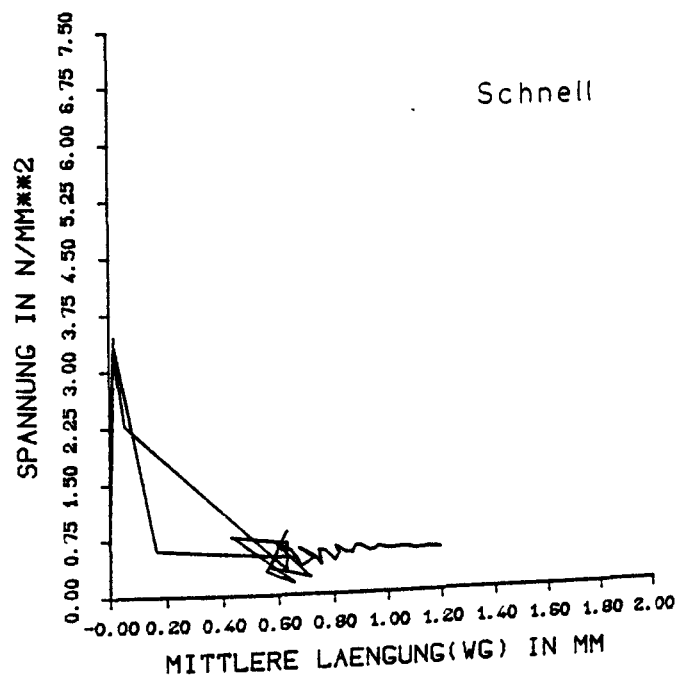
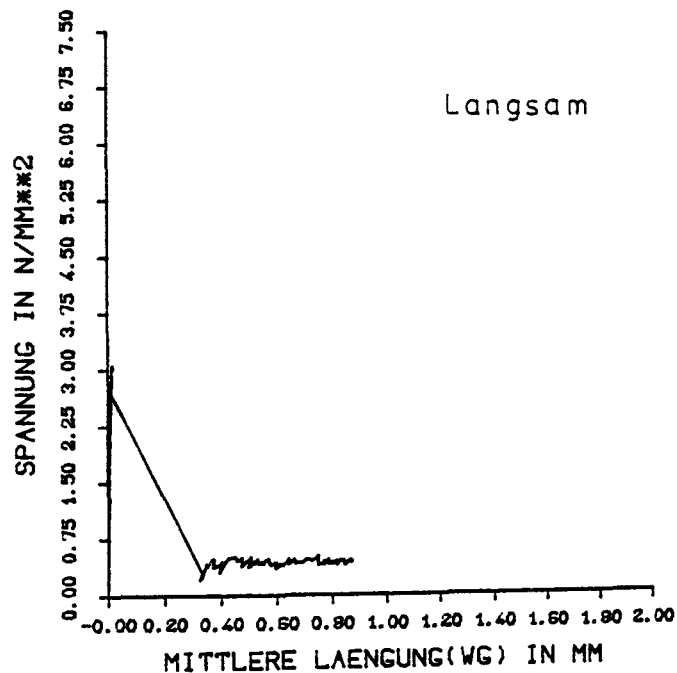
Mittlere Längung zentrisch gezogener Betone in Abhängigkeit von der Spannung bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe

SERIE CI:

Glatte Fasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

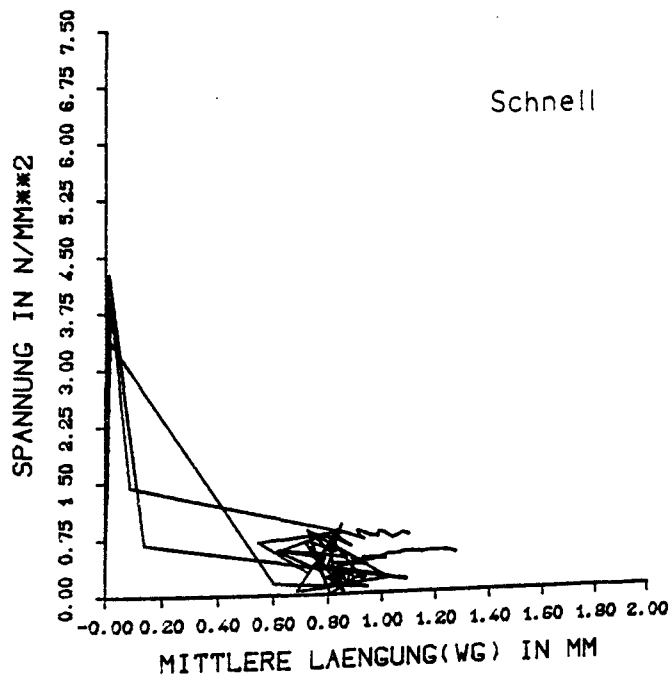
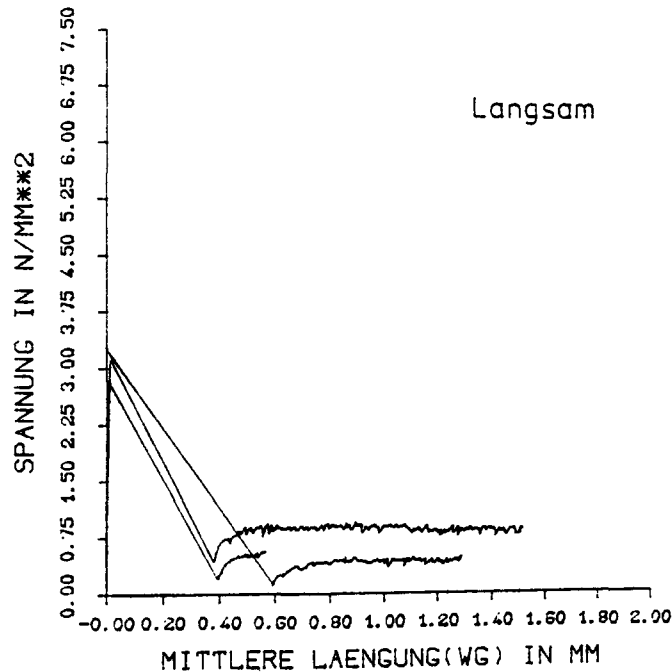
Mittlere Längung zentrisch gezogener Betone in Abhängigkeit von der Spannung bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe

SERIE C II :

Hakenfasern  $\mu_f = 1,50\%$ 

Mittlere Längung zentrisch gezogener Betone in Abhängigkeit von der Spannung bei langsamer und bei schneller Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Versuchsreihe

SERIE C II :

Hakenfasern  $\mu_f = 0,75\%$ 

Mittlere Längung zentrisch gezogener Betone in Abhängig-  
keit von der Spannung bei langsamer und bei schneller  
Belastung; Darstellung aller Einzelversuche einer Ver-  
suchsreihe